VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Vliv metod odporového tvrdého pájení na jakost spojů

Effect of Methods Resistance Brazing for Quality Joints

Student: Bc. Tomáš Jandejsek
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Jandejsek**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Specializace: 20 Strojírenská technologie

Téma: Vliv metod odporového tvrdého pájení na jakost spojů
Effect of Methods Resistance Brazing for Quality Joints

Zásady pro vypracování:

1. Posouzení současného stavu provádění pájených spojů odporovým pájením.
2. Porovnání metod odporového a odporového středofrekvenčního pájení a jejich vliv na kvalitu spojů.
3. Provedení pájených spojů oběma metodami odporového pájení.
4. Posouzení pájených spojů.
5. Porovnání obou metod pájení s ohledem na produktivitu a kvalitu spojů.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOUKAL, J., SCHWARZ, D., HAJDÍK, J. *Materiály a jejich svařitelnost* . (Učební texty pro kurzy IWE/IWT). Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009, 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
HLAVATÝ, I. *Teorie a technologie svařování*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009, poslední revize 20. 10. 2011. Dostupné z: < http://fs1.vsb.cz/~hla80 >. ISBN 978-80-248-2414-7.
HRIVŇÁK, I. *Zváranie a zvariteľnost materiálov*. Bratislava:Veda, 2009, 486 s. ISBN 97-880-2273-167-6.
TURŇA, M. *Špeciálne metódy zvárania*. Bratislava: ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00097-9.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Zdeněk Hotmar

Datum zadání: 13.12.2013
Datum odevzdání: 19.05.2014

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA • OSTRAVA • Fakulta strojní -5-

Ing. Petr Mohyla, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 12.5.2014 .....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :12.5.2014

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Tomáš Jandejsek

Adresa trvalého pobytu autora práce: Studené 49
Jablonné nad Orlicí
561 64

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

JANDEJSEK, T. *Vliv metod odporového tvrdého pájení na jakost spojů: diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2014, 62 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá vlivem použití rozdílných metod odporového tvrdého pájení na jakost pájených spojů. V teoretické části jsou uvedeny principy odporového pájení, technologie pájení, vliv pájek a tavidel na jakost pájených spojů a způsoby jejich kontroly. Experimentální část práce se zabývá posouzením stávajícího pájení dílu BH 630 s ohledem na navrhovaný nový způsob pájení. V závěru práce jsou vyhodnoceny výsledky pájených spojů provedených oběma metodami pájení pomocí nedestruktivních i destruktivních zkoušek.

THESIS ANNOTATION

JANDEJSEK, T. *Effect of Methods Resistance Brazing for Quality Joints: thesis*. Ostrava: VSB – Technical University Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Mechanical Technology Department, 2014, 62 p. Thesis leader: doc. Ing. Ivo Hlavatý, PhD.

The thesis deals with the effect of using different methods of resistance brazing on the quality of soldered joints. In the theoretical part, the principles of resistance soldering, the soldering technologies, the solder and flux influence on the quality of soldered joints, and the manners of their checking are stated. The experimental part of the thesis contains the assessment of the existing soldering of part BH 630 with regard to the proposed new manner of soldering. The conclusion of the dissertation evaluates the results of soldered joints performed using both soldering methods with non-destructive and destructive tests.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce doc. Ing. Ivu Hlavatému, Ph.D. za jeho odbornou pomoc, cenné rady a připomínky, které mi pomohly při zpracování diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat společnosti OEZ s.r.o., za možnost spolupráce a především Ing. Zdeňku Hotmarovi, za výbornou spolupráci a poskytnutí potřebných informací.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů:

Značení	Význam	Jednotka
Ag15CuP	stříbro-měď-fosforová pájecí slitina	
AG4	tavidlo pro pájení kontaktu	
AgNi40	dosedací kontakt	
BH 630	pohyblivý odporově spájený vodivý pás	
BD 40	pneumatická odporová bodová svářečka	
DHS	software pro snímání povrchu	
HB	tvrdost podle Brinella	
HV	tvrdost podle Vickerse	
I	elektrický proud	[A]
I_S	svařovací proud	[A]
P_S	přítlačná síla	[N]
Q	množství tepla	[J]
R	elektrický odpor	[Ω]
R_d	odpor svařovaných materiálů	[Ω]
R_k	odpor mezi svařovanými materiály	[Ω]
R_m	odpor vlastních svařovaných materiálů	[Ω]
R_{sv}	výsledný odpor	[Ω]
t	doba průchodu proudu	[s]
TECNA 2118	středofrekvenční odporová svářečka	
TE 600	mikroprocesorová řídící jednotka	
TOO	tepelně ovlivněná oblast	
t_S	svařovací čas	[s]
ULB 1.4	řídící jednotka	
ViaFix	dvousložková směs	

1. Úvod

Hlavním trendem současné výroby dílů v automobilovém průmyslu je zvyšování kvality výrobků při ekonomizaci výrobních procesů. Touto problematikou se také zabývá společnost OEZ s.r.o., jejímž hlavním cílem je inovace technologií pájení, kdy se zastaralé a méně výkonné metody pájení nahrazují novými výkonnějšími technologiemi.

Cílem této práce je posouzení vlivu metod odporového tvrdého pájení na jejich jakost kdy se porovnává klasická konvenční odporová metoda s frekvencí 50Hz a nekonvenční metoda využívající třífázově napájený invertor s výslednou frekvencí 1kHz. Cílem je dosáhnout zvýšení kvality pájených spojů z pohledu pevnosti a elektrické vodivosti se současným snížením časů potřebných pro zhotovení pájených spojů.

Teoretická část je zaměřena na teorii odporového svařování, pájení a vlivu přídavných materiálu a tavidel na jakost spojů společně se způsoby detekování různých druhů vad v pájených spojích.

Praktická část práce se nejprve zabývá posouzením stávajících prvků odporově pájeného pohyblivého vodivého pásu BH 630 a jeho částí, který je součástí elektrického jističe Modeion vyráběného firmou OEZ s.r.o.

V další části je porovnávána původní metoda s novou středofrekvenční metodou o frekvenci 1kHz, která by případně měla 50 Hz metodu nahradit. Posouzení obou způsobů pájení se zaměřuje na použití jednotlivých parametrů obou strojů a možnosti řízení pomocí jejich řídících jednotek s jejich vlivem na kvalitu odporově pájených spojů.

Experimentální část práce se zabývá konkrétním provedení všech pájených spojů pomocí obou metod s dokumentací nastavených parametrů. Při špatném nastavení parametrů pájení mohou vznikat nevyhovující spoje s různými typy vad, které jsou v práci rozebrány.

V závěru práce jsou uvedeny způsoby kontroly odporově pájených spojů za účelem zhotovování pájených spojů s vyhovujícími výsledky. Součástí práce jsou výsledky dosažené pomocí destruktivních i nedestruktivních kontrol všech pájených spojů.

2. Odporové svařování

Odporové svařování patří mezi progresivní metody spojování materiálů aplikované zejména ve velkosériové výrobě.

2.1 Charakteristika metody

Odporové svařování se řadí mezi metody tlakového svařování, kdy teplo potřebné ke svařování vzniká přechodovým odporem průchodem proudu mezi elektrodami přes přídavný materiál. Vlastnosti metod odporového svařování lze charakterizovat vysokou rychlostí svařování ve všech svařovacích polohách a možnostmi svařování většiny kovových materiálů v hromadné i malosériové výrobě.

Odporové svařování lze z technického hlediska charakterizovat následovně [1]:

- polohy svařování:	všechny
- rozsah svařovaných tlouštěk:	0,4 až 4,0 mm
- druh svařovaných materiálů:	nelegované oceli, legované oceli, Al, Ni, Cu, a jejich slitiny.
- velikost svařovacího proudu:	10^3 – 10^5 A
- druh svařovacího proudu:	střídavý
- sekundární napětí:	0,5 – 10 V
- svařovací čas:	0,04 – 2,0 s
- přítlačná síla:	500 – 10^4 N
- průměr elektrod:	2 – 3 mm

2.2 Princip metody

Při odporovém svařování je zdrojem tepla elektrický odpor, který vzniká v místě kontaktu svařovaných materiálů při průchodu elektrického proudu. Tento odpor se nazývá přechodový a v jeho místě dochází k místnímu k ohřevu svařovaných materiálů, které se ve svařovaném místě stávají plastické, nebo se roztaví. Poté dochází ke stlačení materiálů, čímž vzniká svarový spoj. Pro potřebné stlačení materiálu v místě provádění svaru, musí být odporové svařovací stroje vybaveny kromě výkonového elektrického zdroje také mechanickými, nejčastěji pneumaticky ovládanými prvky, které nám stlačení během celého svařovacího procesu zajistí.[1]

V místě přechodového odporu vzniká podstatné množství tepla, které je možné stanovit podle Joule-Lenzova zákona [2]:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t$$

Q – množství tepla [J]
R – elektrický odpor (přechodový) [Ω]
I – elektrický proud [A]
t – doba průchodu proudu [s]

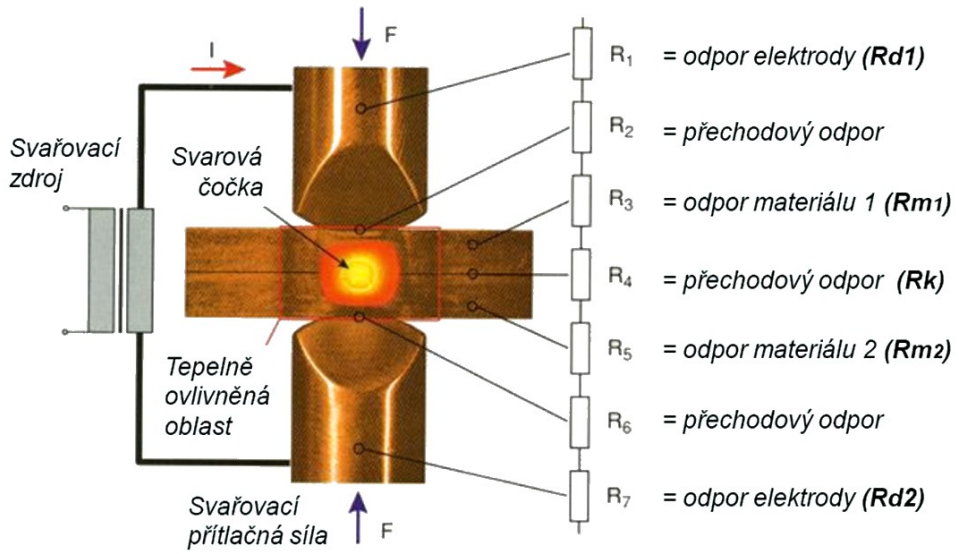
Z hlediska zdrojů tepla při odporovém bodovém svařování rozeznáváme několik dílčích typů odporů.

- R_d - odpor dotyku elektrod
- R_m - odpor vlastních svařovaných materiálů
- R_k - odpor mezi svařovanými materiály.

Celkový odpor R_{SV} při odporovém svařování je dán jejich součtem a vyjadřuje se pomocí vztahu [3]:

$$R_{SV} = R_{m1} + R_{m2} + R_{d1} + R_{d2} + R_k$$

Rozložení jednotlivých složek odporů přechodového odporu při odporovém bodovém svařování je zobrazeno na Obr.2.1.



Obr. 2.1 *- Rozložení dílčích částí přechodového odporu [3]*

2.3 Parametry svařování

Při všech způsobech odporového svařování mají velký význam parametry svařovacího procesu. Vzájemná vazba hlavních svařovacích parametrů bývá označována jako svařovací režim a jejich časový průběh jako svařovací program. Při bodovém odporovém svařování se jedná o tyto parametry:

- svařovací proud I_S,
- přítlačná síla P_S,
- svařovací čas t_S

Při odporovém švovém svařování jsou důležitými parametry rychlost svařování nebo přerušování svařovacího proudu. Pro různé metody odporového svařování se tedy hlavní parametry svařování mohou lišit.

Tvrdý svařovací režim:

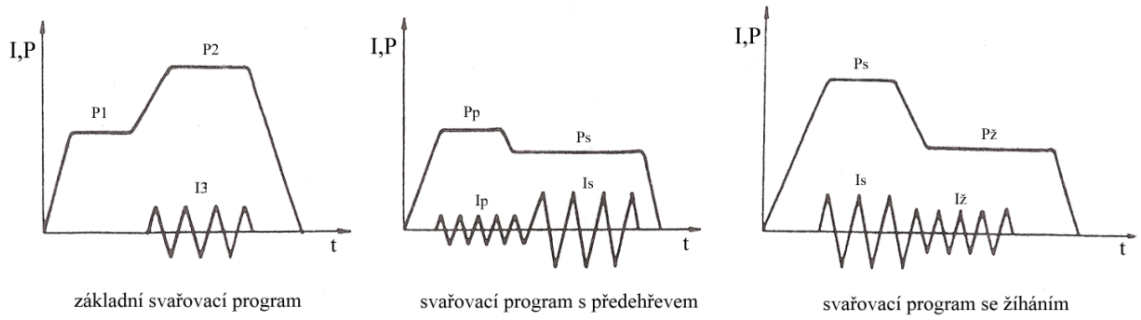
V současné době se jedná o častěji využívaný režim odporového svařování. Nachází uplatnění při svařování legovaných ocelí, neželezných kovů a jejich slitin.

Výhodou tvrdého svařovacího režimu jsou krátké svařovací časy. Krátkodobé působení svařovací teploty vede k menší TOO a jemnozrnné struktuře svarového kovu. Životnost elektrod je používáním vyšších tlaků a tím snížení přechodového odporu dotyku R_d vyšší. Nevýhodou je nutnost důkladné přípravy svařovaných dílů a vyšší náklady na pořízení stroje s jeho energetickou náročností. Pro tvrdý svařovací režim je charakteristický vysoký svařovací proud, krátký svařovací čas a vyšší přítlačná síla. [4]

Měkký svařovací režim:

Tento svařovací režim nachází uplatnění pro opravy a zpracování plechů a není oproti tvrdému svařovacímu režimu tolik náchylný na odchylky svařovacích parametrů a jejich čistotu spojovaných ploch. Svařovací zdroj nevyžaduje tak velký příkon a snižuje se nebezpečí zakalení materiálu u ocelí s vyšším obsahem uhlíku. Nevýhodou měkkého svařovacího režimu jsou delší svařovací časy, které vedou k vyšším ztrátám energie a většímu tepelnému namáhání elektrod. To vede k jejich rychlému opotřebení a tím časté údržbě nebo úplné výměně. Pro režim je charakteristický nižší svařovací proud, nižší přítlačná síla a delší svařovací čas.

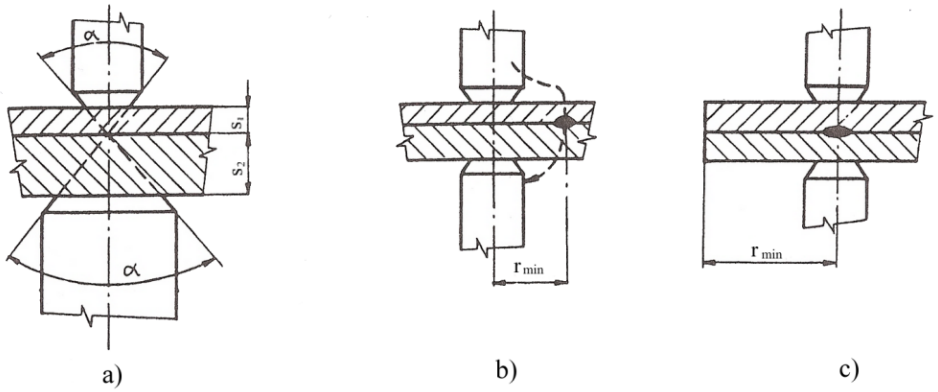
Správné nastavení vzájemného poměru velikosti parametrů odporového svařování není úplnou zárukou kvalitního svaru. Důraz je také kladen na časový průběh označovaný jako svářecí program. Veškeré odporové svařovací stroje pracují na technologické zásadě, že svářecí proud je do svařovaného předmětu přiveden až po dosažení příslušného svařovacího tlaku P_S a s určitým časovým zpožděním. U některých strojů se můžeme setkat i s dalšími druhy zpoždění, ty však patří ke složitějším svařovacím programům. Několik druhů svařovacích programů je uvedeno na Obr.2.2. [4]



Obr. 2.2 *- Svařovací programy odporového svařování [4]*

2.4 Tepelná rovnováha ve svarových spojích

Tepelná rovnováha u odporového svařování významně ovlivňuje rovnoměrnost provaření obou svařovaných součástí. Významnou roli hraje také při svařování různých materiálů a rozdílných tloušťek. Z těchto důvodů se při svařování plechů na stranách větších odporů volí větší průměry elektrod (Obr. 2.3). Je nutné brát v úvahu i vzdálenost dvou svarů od sebe nebo vzdálenost od okraje plechů. K tomu se užívá diagramů a monogramů.[3]



Obr. 2.3 *- Řešení tepelné rovnováhy u odporového svařování [4]*
a) různé tloušťky svařovaných plechů
b) vzdálenost dvou sousedních svarů
c) vzdálenost svaru od kraje plechu

2.5 Typy elektrod

Elektroda přichází do přímého kontaktu se svařovanými dílci a jejím úkolem je přivést do místa svaru relativně velký svařovací proud. Z důvodu elektrické a tepelné vodivosti je zhotovena z materiálu, jehož základem je měď. Ideální materiál pro elektrody odporových svařovacích zařízení by měl mít tyto vlastnosti:

a) vysoká elektrická a tepelná vodivost,
b) dostatečná mechanická pevnost,
c) vysoká odolnost proti oxidaci,
d) co nejmenší sklon k legování svařovaným materiálem,
e) dobrá odolnost proti opotřebení za vyšších teplot,
f) dobrá obrobitelnost.

Výchozím materiálem elektrod pro odporové svařování je měď. Pomocí tváření za studena lze u mědi dosáhnout zvýšení hodnoty tvrdosti na 120 HB. To se však při dosažení teploty kolem 200°C trvale ztratí. Teploty na ploše elektrody při odporovém svařování běžně dosahují hodnot až 600 – 700°C. Z tohoto důvodu je možné stálost tvaru udržet pouze mechanicky a tepelně zpracovanou mědí. Nejčastěji využívaným legujícím prvkem je chrom. Ten se při tepelném zpracování vylučuje na hranicích zrn mědi a takto tepelně zpracovaná slitina dosahuje stále tvrdosti až do teplot cca 500°C. Při opakovaném překračování této teploty dochází k otlačování elektrod, stejně jak je tomu u elektrod nelegovaných. Z těchto důvodů je hlavní zásadou odporového svařování důkladné chlazení elektrod.[4]

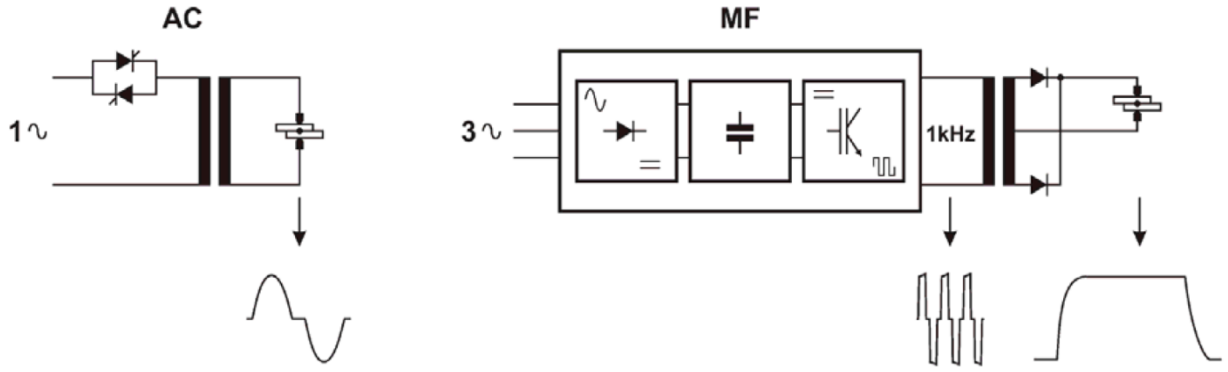
<u>Údržba elektrod</u>

Elektrody odporových svařovacích zařízení podléhají opotřebení. Údržba špičky elektrody se však nesmí provádět pomocí hrubého pilníku, jelikož pracovní tlak se pak nepřenáší celou plochou elektrody. To vede to k jednoznačnému snížení životnosti, ohřívaní a legování elektrody svařovaným materiálem nebo lepení svařovaného materiálu na elektrody. Údržbu lze tedy provádět pouze jemným smirkovým plátnem.

2.6 Středofrekvenční odporové svařování

Klasické odporové svařovací stroje pracující při kmitočtu 50 Hz jsou charakteristické tím, že se jako jednofázová zařízení připojují na sdružené fázové napětí 400 V, z čehož vyplívá, že z napájecí sítě jsou zatěžovány pouze dvě fáze. Střídavý elektrický proud prochází po každé půlperiodě nulou, a tím dochází ke snížení jeho energetické hodnoty. Elektronické řízení posouváním úhlu zapalování výkonových tyristorů tento průchod nulou ještě prodlužuje a to každou půlperiodu. K tomuto jevu dochází, ať je svařovací proud zadáván v procentech primárního proudu nebo přímo v kiloampérech sekundárního proudu. Při velkém snížení výkonu v porovnání s maximálním výkonem stroje jsou malé impulzy proloženy přestávkami. Z tohoto důvodu se na strojích s vysokým výkonem špatně svařují drobné díly z plechů o malých tloušťkách. Kromě elektronického řízení svařovacího proudu, je při střídavém proudu svařovací výkon ovlivněn impedancí sekundárního obvodu, která při zvětšení vyložení nebo rozevření ramen, případně vložením svařovaného materiálu do sekundárního obvodu, snižuje výkon stroje. Pro svařování hliníku a jeho slitin není průchod střídavého proudu vhodný. [5]

Středofrekvenční odporové svařování je metoda splňující vzrůstající požadavky na jakost a produktivitu odporového svařování. Tato metoda využívá třífázovou sítí napájený invertor, ve kterém je proud pomocí diod usměrněn, kondenzátory vyfiltrován a v konvertoru dochází k vytvoření napětí 500 V při kmitočtu 1000 Hz. Využívá se speciální svařovací transformátor s usměrňovačem, který dodává stejnosměrný proud do svařovacího procesu. [6]



Obr. 2.4 *- Jednofázový a třífázový středofrekvenční svařovací zdroj [6]*

Technika středofrekvenčního svařování umožňuje vysoce jakostní svary při následujících výhodách proti tradičnímu odporovému svařování s frekvencí 50 Hz:

- lze svařovat hliník, jeho slitiny a jiné kovy s obtížnou svařitelností,
- vhodné pro svařování materiálů s rozdílnou vodivostí,
- souměrné rozdělení odběru na všechny fáze,
- svařovací impuls je tvarován v milisekundách,
- stejnosměrný tvar impulzu je obdélníkový nebo lichoběžníkový bez vlnění,
- stroj svařuje jedním nebo více impulsy s přesnou dodávkou energie, bez ohledu na konec nebo začátek výkonového rozsahu,
- vysoká přesnost a konstantní svařovací proud,
- malá citlivost na výkyvy v síti,
- vysoká opakovatelnost svařovacího cyklu,
- snížení nákladů vyšší efektivností průchodu svařovacího proudu,
- při optimálním svařování se snižuje rozstřik,
- prodlužuje se životnost elektrod díky kratším svařovacím časům,
- nižší vtisk elektrod do materiálu,
- vyšší produktivita díky kratším svařovacím časům,
- vysoká kvalita svarů,
- menší ztráty vedením tepla.

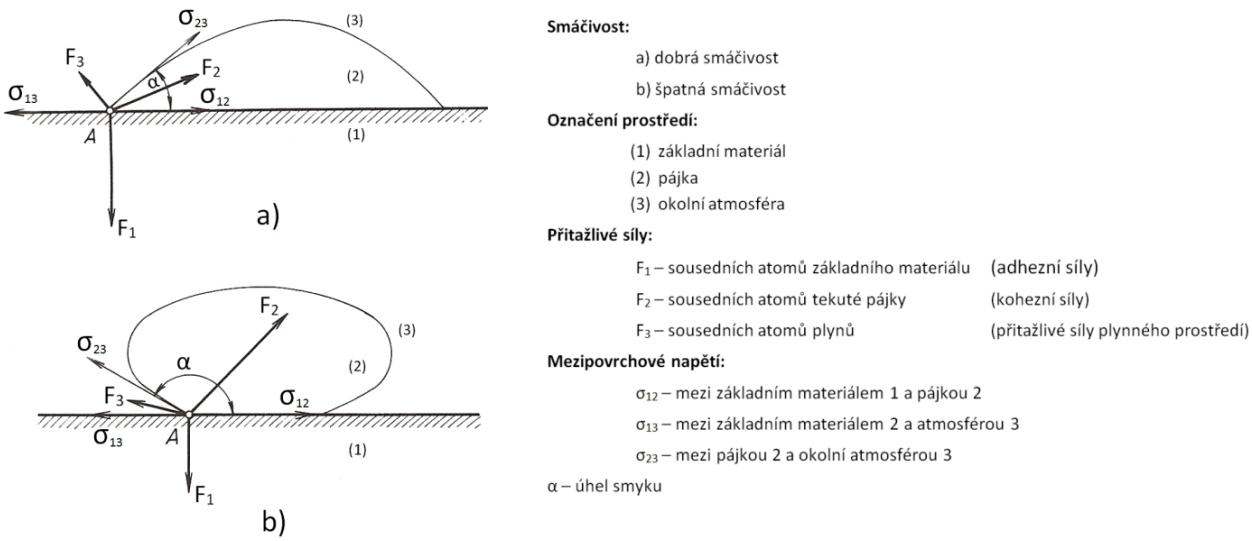
Obr. 2.5 *- Středofrekvenční svařovací stroje[6]*

3. Pájení

Pájení lze popsat jako metalurgický způsob spojování kovových součástí roztavenou pájkou. Při procesu ovšem nedochází k natavení ploch základních materiálů, ale jen k jejich smáčení aplikovanou pájkou. Kvalita pájeného spoje je podmíněna dobrou smáčivostí spojovaných materiálů tekutou pájkou.

3.1 Smáčivost a roztékavost

Smáčivost je schopnost tekuté pájky a tavidla přilnout při určité teplotě k čistému spojovanému materiálu. Roztékavost je naopak definována jako schopnost tekuté pájky a tavidla roztéci se po vodorovném povrchu základního materiálu. Kapka roztavené pájky nabude při smáčení takového tvaru, při kterém je povrchová energie systému základní materiál – pájka – tavidlo – atmosféra a mohou tedy působit meziatomové síly. Z Obr. 3.1 je patrné, že na kapku pájky v bodě A působí tři druhy přitažlivých sil. Jedná se o síly adhezní, kohezní a přitažlivé síly plynného prostředí. Na základě působení těchto druhů sil rozeznáváme tyto dva možné případy. Prvním případem je dokonalá smáčivost, která se vyznačuje tím, že síly kohezní jsou menší než adhezní. Naopak nesmáčivost nastane v případě, kdy kohezní síly jsou větší než adhezní.[7]



Obr. 3.1 *- Schematické znázornění smáčivosti [4]*

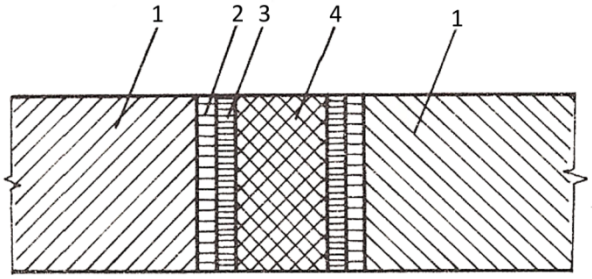
3.2 Metalurgické reakce při pájení

Během pájení je ve vzájemném styku tekutá pájka se základním materiálem a to po určitou dobu podle druhu zdroje tepla. Tímto je splněn podstatný předpoklad metalurgických reakcí v oblasti spoje. Podle druhu základního materiálu a pájky může na rozhraní jejich vzájemného styku nastat některá z uvedených reakcí:

- adhezní spojení,
- rozpouštění základního materiálu aplikovanou pájkou,
- vzájemná difuze základního materiálu a pájky,
- reakce složek pájky s povrchovým oxidem základního materiálu.

V případě adhezního spojení se jedná o případ spojení, při kterém nedochází k vzájemné rozpustnosti základního materiálu a pájky. Tohoto spojení využíváme v případě, kdy při spojování nesmí dojít ke změně chemického složení spojovaných materiálů. S tímto případem se můžeme setkat u výroby křemíkových diod. Spoje se vyznačují dobrou elektrickou vodivostí, ale menší pevností v ohybu a smyku.

Nejčastěji se při pájení vytvoří přechodové oblasti určité tloušťky. Přechodové oblasti se vyznačují jinými chemickými, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi než spojované materiály. Vlastnosti této přechodové oblasti nám určují konkrétní užitné vlastnosti pájeného spoje. Nejčastěji se tedy pájené spoje skládají ze čtyř oblastí a to základního materiálu, pájky a přechodových oblastí mezi nimi. Oblasti jsou schematicky znázorněny na Obr. 3.2.



1 – základní materiál s nezměněným chemickým složením,
2 – přechodová oblast na straně základního materiálu,
3 – přechodová oblast na straně pájky,
4 – pájka ve vytaveném stavu.

Obr. 3.2 *- Schéma pájeného spoje [7]*

V obecném případě však nemusí dojít k vytvoření všech oblastí, ale k vytvoření pouze některých oblastí z výše uvedených.

3.2.1 Difuze

Předpokladem vzniku difuze při pájení je přemístění atomů základního materiálu a pájky, které je podmíněno nehomogenitou složení. Difuzní procesy v pevných kovech jsou závislé na typu a nepravidelnostech stavby jejich krystalické mřížky. U kovů s hustějším uspořádáním atomů probíhá difuze pomaleji než u kovů s mřížkou kubickou prostorově centrovanou. Součinitel difuze se zvětšuje s větší hustotou poruch krystalické mřížky kovů. Hustota dislokací a vakancí, velikost zrna a množství deformací v kovu závisí na způsobu výroby kovu a jeho tepelném a mechanickém zpracovaní. Zakalením zvyšujeme koncentraci vakancí v kovu. Plastická deformace má za následek vznik drobných zrn a zvyšuje hodnotu dislokací. Zmíněné procesy proto difuzi zrychlují. [8]

3.3 Pájky

Pájkou označujeme přídavný materiál používaný při pájení. Vlastnosti jsou posuzovány z několika hledisek [7]:

- pájka musí mít nižší teplotu tavení, než kovy, které spojujeme;
- pájky určené pro kapilární pájení mají mít úzký interval tavení (<100°C). Při širším intervalu, především při pomalém ohřevu se projevují snadno tavitelné složky, které mají díky nižší teplotě tavení snahu se od sebe oddělit. Složka pájky s nižší teplotou tavení začne téci nejdříve a nechává za sebou jakousi skořápku, která se skládá ze složek pájky s vyšší teplotou tavení. Tento jev je při pájení nežádoucí. Jelikož vniklá skořápka není dostatečně tekutá, nedojde k dokonalému vyplnění pájené mezery;
- pájky se širokým intervalem tavení (> 100°C) mají při kapilárním pájení horší pájecí vlastnosti. Nacházejí však využití při nánosovém pájení;
- chemické složení pájky nemusí mít stejné ani podobné složení jako spojované materiály;
- při pájení by měly mít prvky základního materiálu a pájky určitou rozpustnost a difuzní schopnost při procesu pájení;
- výhodné je používat pájky s malým rozdílem elektrického potenciálu z důvodů možnosti následného vzniku koroze;
- vyhovující spoj závisí na chemickém složení pájky a kvalitě difuzní oblasti spoje. Pájka tedy musí vykazovat nejen dobře mechanické vlastnosti, ale mít i schopnost vytvářet pevné spoje;

- vhodný výrobní tvar pájky hraje z technologických důvodů také svoji roli a volí se podle základního materiálu, konstrukce spoje, technologie pájení nebo požadavku na spoj.

Pájení se všeobecně podle teploty dělí na měkké a tvrdé pájení. Hranicí mezi oběma metodami pájení je teplota 450°C. Jako měkké pájky se označují pájky s teplotou tavení do 450°C. Naopak tvrdé pájky používají teplot tavení vyšších než 450°C.

3.4 Tvrdé pájky na bázi Ag

Pájky na bázi stříbra se používají v průmyslové výrobě, i když mají nižší pájecí teplotu. Podle obsahu Zn a Cd se pájecí teplota pohybuje v rozsahu od 630°C do 800°C. Teplota tavení pájky s rostoucím obsahem Ag klesá a to až do 45% Ag. Při vyšším obsahu teplota opět stoupá a to asi s intenzitou 2°C na každé 1% Ag. [4]

Stříbrné pájky lze kromě kovů lehko tavitelných a lehkých s výjimkou titanu a jeho slitin aplikovat na spojování téměř všech železných a neželezných kovů. Pro pájení železných kovů by měly mít stříbrné pájky nižší obsah nečistost, než pro pájení neželezných kovů. Cílem je především omezit obsah prvků, které vytvářejí při pájení ocelí křehké přechodové oblasti, které mají za následek snížení antikorozních i deformačních vlastností pájeného spoje.

Vliv jednotlivých prvků na pájky báze Ag [7]:

Sn - snižuje teplotu tavení pájky s malým obsahem Ag, ale zvětšuje její křehkost. Obsah Sn v pájce by neměl překročit 0,1%;

Si - jeho obsah v pájce by neměl být nižší než 0,05%. Zabraňuje vypalování Zn v pájce a zmenšuje pórovitost;

P - obsah fosforu je limitován hodnotou 0,014%. Je to z důvodu, že při pájení ocelí dochází k tvorbě křehké přechodové oblasti, která snižuje pevnost v tahu a především pevnost v ohybu spoje. Fosfor ovšem při pájení mědi působí jako dezoxidační činitel;

Mn - zlepšuje pevnost v tahu, ale snižuje možnost ohybu spoje;

Ni - zlepšuje mechanické vlastnosti spoje a odolnost proti korozi;

Fe - zvyšuje tvrdost pájky;

Al - zhoršuje tekutost pájky. Jeho obsah je limitován na max. 0,001%;

Cd - zlepšuje roztékavost, ale zároveň snižuje pevnost pájky. Nahrazuje v pájce Zn a podstatně snižuje teplotu tavení pájky ovšem stejně jako Zn se snadno odpařuje;

Pb - při obsahu vyšším než 0,1% zvětšuje pórovitost a při pájení ocelí i křehkost spoje.

Norma DIN 8513 definuje obsah nečistot v pájkách na max. 0,15%. V současné době se pájky vyrábějí právě podle DIN. Norma ČSN připouští vyšší obsah nečistot.

3.4.1 Pájky na bázi Ag – Cu – P

Pájky s definovaným obsahem fosforu jsou především určeny pro pájení mědi a stříbra bez použití tavidla. Využití nacházejí při pájení elektrických spojů transformátorů, elektromotorů, tepelných výměníku nebo právě dosedacích kontaktů pohyblivých vodivých pásů elektrických jističů. V případě užití tavidel lze tyto pájky použít i pro pájení slitin mědi. Pájka je vyráběna ve tvaru drátku nebo pásky. Vyznačuje se širokým intervalem tavení, a proto je třeba používat rychlého ohřevu. Pájka se vyznačuje dobrou tekutostí a optimální šířka mezery ve spoje je od 0,07 mm až po 0,12 mm. [7]

3.5 Tavidla

Mezi hlavní termochemická kritéria patří kromě pájitelnosti základního materiálu pájkou také teplota pájení při zajištění požadovaných vlastností tavidla po celou dobu pájení. Mezi základní pravidla pro volbu tavidla patří druh základního materiálu, použitá pájka s její teplotou tavení a druh s tloušťkou povrchové oxidické vrstvy. Tavidlo musí splňovat tyto funkce a charakteristické vlastnosti [4]:

1. dostatečné smáčení základního materiálu a pájky,
2. reakční teplota tavidla musí být o 50 až 150°C nižší, než je teplota tavení pájky,
3. množství tavidla závisí na tloušťce a rozsahu oxidických vrstev,
4. viskozita tavidla má být v oblasti pracovních teplot minimální a to až do teplot o 200°C nižších, než je teplota solidu pájky z důvodu dobré roztékavosti, krytí pájky a pro snadnou propustnost plynů,
5. tavidlo má mít po dobu pájení stálé povrchové napětí,
6. tavidlo zabraňuje přístupu vzduchu k pájenému povrchu,
7. hustota tavidla musí být vždy nižší, než je hustota pájky,
8. vyžaduje se chemická stálost tavidla při teplotě 20°C i při teplotě pracovní,

9. nenáročná odstranitelnost zbytků tavidla po vychladnutí spoje,
10. interval tavení tavidla by měl být co nejkratší,
11. minimální tvorba zdraví škodlivých sloučenin, plynů a kovových par při pájení.

Tavidla mohou být v různé formě, např. ve formě prášku, kapaliny, pasty, ochranné atmosféry nebo lze místo tavidla použít vakuum. Podle ČSN 05 5705 se dělí na tavidla s leptavým účinkem, bez leptavého účinku, na lehké kovy a na těžké kovy. Podle stejné normy tyto tavidla může rozdělit i podle výšky reakční teploty na tavidla pro:

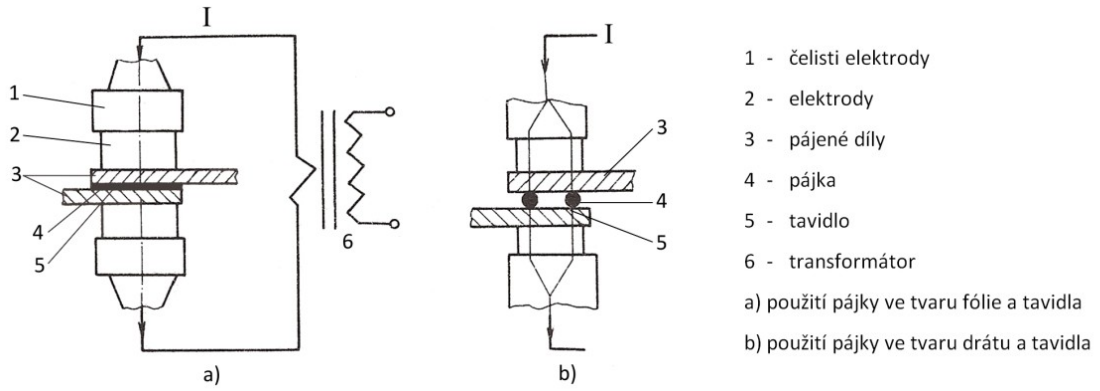
a) pro měkké pájení:	50 až 150°C	b) pro tvrdé pájení:	550 až 750°C
	150 až 400°C		750 až 1000°C
			nad 1000°C

3.6 Metody pájení

Pro vytváření pájených spojů lze použít celou řadu metod pájení, které se od sebe liší především způsobem a rychlostí ohřevu pájeného místa. Ohřev může probíhat v celém objemu součásti nebo jen v oblasti pájeného spoje, který se označuje jako místní. Aplikace jednotlivých metod pájení hlavně liší podle toho, zda se jedná o pájení tvrdé nebo měkké. Mezi nejběžnější metody patří pájení pájkou, plamenem, ponorem, v peci, ve vakuu, elektrickým obloukem nebo laserem. [4]

3.6.1 Pájení odporovým teplem

Zdrojem tepla je elektrický odpor. Tímto způsobem je možný rychlý lokální ohřev v oblasti spoje a kontrola přesně nastavených parametrů.



Obr. 3.3 *- Princip ohřevu odporovým teplem [7]*

Množství vznikajícího tepla je dáno Joule-Lenzovým zákonem, kde celkový odpor se skládá z odporu elektrod, pájených předmětů, přechodových odporů v místě styku elektrody s pájenou součástí a odporu v místě styku pájených dílů. Pájení elektrickým odporem má tyto výhody [7]:

- rychlý místní ohřev i u velkých průřezů,
- možnost mechanizace a automatizace,
- jednoduchá regulace ohřevu,
- přesné dávkování množství tepla,
- vysoká produktivita práce,
- jednoduchost procesu,
- hygiena a bezpečnost práce.

Nevýhodou odporového pájení je fakt, že prochází-li proud přímo pájenou plochou, působí neroztavené tavidlo jako izolant. Proto je vhodné používat v určitých případech pájku ve tvaru drátu.

Uplatnění této metody je především v elektrotechnickém průmyslu při spojování vodičů s tepelně citlivou izolací, při spojování kontaktů na pohyblivé vodivé pásy jističů a jiných spojů kombinací Ag s Cu. Ve strojírenství se využívá při spojování destiček SK s držáky řezných nástrojů nebo při spojování pilových pásů.

3.7 Vady pájených spojů

Pájený spoj musí mít takové užitné vlastnosti, které jsou od něj v provozu požadovány. Přítomnost různých vad v pájeném spoji při nedodržení podmínek pájení více či méně ovlivňuje jeho užitné vlastnosti. Velikost, počet a druh defektů je zásadní pro pevnostní podmínky spoje, korozní odolnost a elektrickou vodivost. Jejich povolený rozsah a množství se stanovuje podle požadavků, které jsou kladeny provozem na pájený spoj. Přípustnost některých vad ve spojích závisí především na:

- typu pájeného spoje,
- druhu a orientaci vady,
- velikosti vady,
- provozním namáhání,
- prostředí a teplotě.

V praxi není možné vyrobit pájený spoj, který by byl naprosto bez chyb.

Z hlediska účinků na užitné vlastnosti spoje lze vady pájených spojů zařadit do dvou základních skupin na vady plošné a prostorové.

Plošné
- nesmáčená místa,
- křehké strukturní fáze v přechodové oblasti,
- křehké strukturní fáze v pájce,
- zanesené zbytky tavidla do spoje,
- trhliny.

Prostorové
- póry,
- dutiny,
- krápníky,
- nedokonale vyplněný spoj,
- malý přechod pájky.

Nejvíce nebezpečné jsou vady plošné, jelikož vyvolávají velkou koncentraci napětí. U prostorových vad s určitým poloměrem zaoblení není tak velké riziko a to i v případě, že vady tvoří shluky. Jelikož cílem je zhotovovat spoje s co nejmenším počtem vad je důležité znát jejich příčinu. Nejčastější příčinou vniku defektů je nedodržení předepsaných podmínek z oblasti konstrukce spoje, nevhodná kombinace základních a přídavných materiálů a v neposlední řadě nedodržení technologických podmínek pájení. Proto poznatky získané pomocí destruktivních i nedestruktivních kontrol pájených spojů poskytují cenné informace pro konstruktéry a technology.

Křehké strukturní fáze – vznikají v přechodové oblasti spoje v případě, že pájka obsahuje legující prvky nebo nečistoty, které při krystalizaci vytvářejí eutektické nebo intermediální fáze. Jedná se především o pájky obsahující Al, P, Si, Sb, Bi a Pb. Cílem je tedy snížit obsah těchto složek na minimum. Množství křehkých strukturních fází také úzce souvisí s teplotou a dobou pájení. [7]

Rozpouštění základního materiálu v tekuté pájce – úzce souvisí s chemickým složením základního materiálu, pájky a na podmínkách pájení. Tento jev je nevýhodný předřevším při pájení tenkostěnných materiálů a těžko pájitelných materiálů s tenkou pájitelnou vrstvou z Ag, Au, Cu nebo Sn. Velikost rozpouštění není tak intenzivní při použití pájek obsahující prvky na bázi základního materiálu, nižší teplotě a kratší době pájení.

Zhoršené smáčení pájky – vzniká v důsledku změny povrchové energie ve stykové oblasti mezi pevným základním materiálem a roztavenou pájkou. Tato změna je zapříčiněna intenzivní metalurgickou reakcí, která vzniká rozpouštěním základního materiálu a vzájemnou difuzí prvků základního materiálu a pájky.

Studený spoj – vzniká v případě, kdy má pájená plocha nižší teplotu než je teplota pájecí.

Přehřátý spoj – vzniká jako následek vysoké pájecí teploty. Při přehřátí spoje dochází k místnímu ohřevu na vysoké teploty doprovázených velkým vnitřním pnutím, deformací součástí a trhlinám, které již nelze opravit. Mohou nastat i případy vytečení pájky na opačném konci spoje, spálení tavidla nebo dokonce některých prvků pájky.

Zanesení zbytků tavidla ve spoji – může nastat při vysoké pájecí teplotě, malé mezeře spoje nebo při použití tavidla s nepostačující reakční schopností.

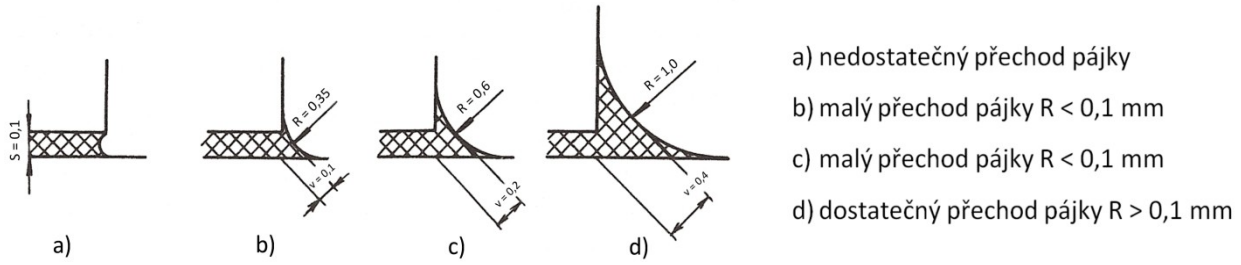
Pájkou nesmáčená místa – nejčastější příčinou vzniku je nevhodná pájecí teplota, znečištění pájených ploch povrchovými oxidy a nečistotami nebo neúčinné tavidlo.

Dutiny – při ochlazování pájka tuhne nejprve na základním materiálu a poté až ve středu. To má za následek vznik dutin.

Póry – vnikají uzavřením plynů ve spoji.

Krápníky – vyskytují se nejčastěji při pájení tištěných spojů. Způsobuje je nadbytečné množství pájky a její nevhodný způsob přidávání do spoje.

Nedostatečně vyplněný spoj – vzniká z hned několika důvodů. Jedná se především o spoje s příliš malou mezerou, krátkou dobu pájení, nedostatečné množství pájky nebo nízkou pájecí teplotu.



Obr. 3.4 *- Přechod pájky u koutového spoje [7]*

Nedostatečný přechod pájky do spojovaného materiálu – může být způsoben nedostatečnou velikostí mezery spoje, malým množstvím pájky nebo nevhodnou pájkou s tavidlem. Jako dostačující přechod pájky a spojení cyklicky namáhaných součástí se označuje poloměr velikosti nejméně 1mm.

Trhliny - vytváří se nejčastěji při rychlém ochlazování, kdy základní materiál a pájky nemají stejný součinitel tepelné roztažnosti nebo při nevhodné konstrukční úpravě spoje v důsledku vysoké koncentrace napětí.

4. Kontrola jakosti pájených spojů

Kvalitních pájených spojů lze dosáhnout pouze dodržováním optimálních podmínek pájení. Do pájecích procesů je tedy nezbytné zařazovat všestrannou kontrolu, která se skládá z:

- kontroly spojovaných materiálů,
- přípravy dílů před pájením,
- kontroly průběhu pájení,
- kontroly hotových výrobků.

Kontrola spojovaných materiálů

Kontrole spojovaných materiálů podléhá základní materiál, pájky, tavidlo, ochranná atmosféra nebo parametry vakua. Vlastnosti pájených materiálů se ověřují zkouškou pájecích vlastností. Při změně materiálu se kontroluje chemické složení a u pájky i tavidla kontrole podléhá teplota tání. V případě ochranné atmosféry se kontroluje obsah oxidačních složek O_2 nebo CO_2. Při pájení ve vakuu kontrolujeme výši vakua vakuometrem.

Kontrola přípravy dílů a průběhu pájení

Jakost pájeného spoje závisí na reprodukovatelnosti stanovených optimálních podmínek pájení. Ve výrobě je proto nutné kontrolovat [7]:

- kvalitu mechanické přípravy pájených ploch,
- čistotu povrchu pájených ploch,
- typ spoje a velikost mezery,
- správnou polohu pájených dílců,
- pracovní podmínky pájení,
- pájecí zařízení a příslušenství.

4.1 Destruktivní zkoušky pájených spojů

Této kontrole se podrobí určité množství výrobků ze série. Jedná se asi o 1 až 5 % a na těchto výrobcích se určí mezní zatížení. Zkušební zatížení má mít vyšší hodnotu než zatížení odpovídající běžným provozním podmínkám. Určuje se pevnost v tahu a ve smyku podle příslušných norem. Není-li dosaženo požadovaných hodnot, je nutné se důkladněji zaměřit na pracovní podmínky pájení. Velmi jednoduchou a rychlou zkouškou únosnosti pájeného spoje je zkouška na ohyb nebo zkouška na krut. Kvalita spoje se hodnotí podle polohy lomu. Za vyhovující pájený spoj se považuje lom, který nastane v základním materiálu. [7]

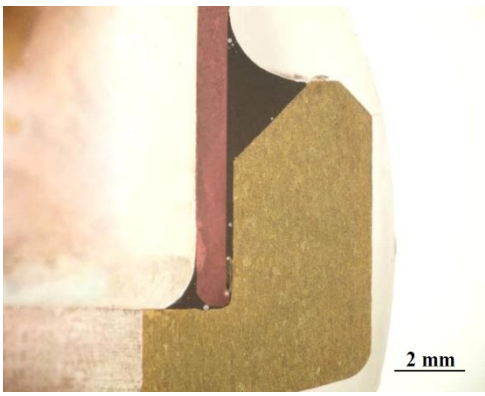
4.1.1 Metalografické zkoušky pájených spojů

Nejčastěji se využívají se při vývoji a technologií pájení pro ověřování stavu pájených spojů. Metalografické zkoušky lze rozdělit podle použitého zvětšení na ověření makrostruktury a mikroskopická pozorování s využitím optické nebo elektronové mikroskopie. Ve všech případech je nutné před samotným pozorováním provést přípravu zkušebního vzorku. Ta se skládá z vhodného odběru mechanickým dělením, následným postupným broušením studovaného povrchu pomocí metalografických papírů a mechanickém nebo elektrolytickém leštění s použitím diamantových past. Takto připravený vzorek se následně musí vyleptat vhodnými chemickými nebo elektrolytickými postupy. Dosažené výsledky metalografických pozorování se obvykle dokumentují pomocí fotografií. [9]

Makrostruktura pájeného spoje

Pro vyvolání makrostruktury je základem zkoušky naleptání předem vybroušeného povrchu vzorku vhodným činidlem. Makrostruktura se hodnotí vizuálně pouhým okem, nebo při malém optickém zvětšení pomocí lupy nebo optického mikroskopu. Vzorky by měly zahrnovat základní materiály, přechodové oblasti a pájku. Při zkoušce makrostruktury pájeného spoje posuzujeme zejména:

- tvar pájeného spoje,
- způsob smáčení,
- výplň mezery spoje,
- výskyt vad ve spoji.

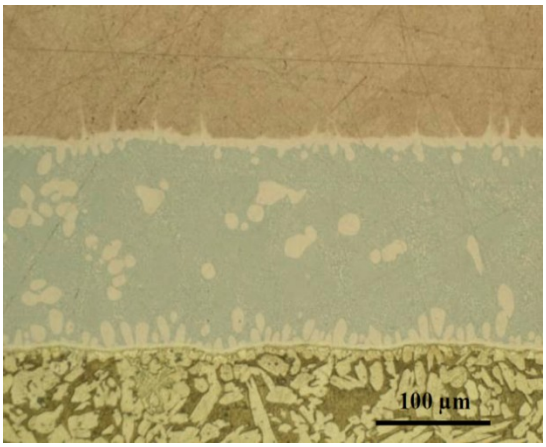


Obr. 4.1 - *Makrostruktura pájeného spoje [10]*

Mikrostruktura pájeného spoje

Při kvalitativních mikrostrukturních rozborech je pozorována mikrostruktura jednotlivých oblastí pájeného spoje na kvalitně připravených metalografických výbrusech zkušebních vzorků při zvětšení 30x až 2000x. Rozbor vyžaduje adekvátní přípravu metalografických výbrusů zkušebních vzorků, znázornění mikrostruktury vhodným leptáním, pozorování mikrostruktury v optickém mikroskopu a její vyhodnocení. Mikrostrukturním posouzením lze hodnotit [9]:

- základních materiálů,
- přechodové oblasti na straně základního materiálu,
- přechodové oblasti na straně pájky,
- pájky ve vytaveném stavu,
- vady pájených spojů.



Obr. 4.2 - *Mikrostruktura pájeného spoje [10]*

4.2 Nedestruktivní zkoušky pájených spojů

Existuje velké množství moderních nedestruktivních kontrol, které lze využít pro kontrolu pájených spojů. Obvykle se dělí podle schopnosti identifikace vad na povrchu pájeného spoje nebo uvnitř spoje.

4.2.1 Vizuální kontrola

Jedná se o nejjednodušší nedestruktivní kontrolu, pomocí které lze detekovat zjevné povrchové defekty. Vizuální kontrola by měla vždy předcházet jiné nedestruktivní metodě, protože může odhalit vady, které mohou bránit správné realizaci či vyhodnocení výsledků jiné kontroly. Podle nástrojů použitých pro kontrolu se dělí na metodu přímou a nepřímou.

a) **Přímá** – kontrola je realizována pouhým okem nebo za pomoci lupy se zvětšením 3 až 6x. Kontrolu lze provádět jen na dostupném povrchu.
b) **Nepřímá** – kontrola se provádí pomocí optických nebo optoelektronických přístrojů. Tyto přístroje se označují jako endoskopy. Využívají se pro kontrolu nepřístupných povrchů, kam se běžně nelze dostat z důvodu geometrie nebo z důvodu ohrožení zdraví pracovníků v chemicky nebo radioaktivně zamořeném prostoru.

Pevné endoskopy – Jejich optický systém je zabudovaný v soustavě pevných trubkových nástavců, které lze spojovat i v určitém sklonu.

Ohebné endoskopy – jsou optickým systémem, který je složen ze svazků jemných skleněných světlovodivých vláken přenášející světelné informace o kontrolované ploše. Lze využívat i dokumentace pomocí fotografií nebo videí v kombinaci s počítačovými systémy, vyhodnocením a archivací dat.

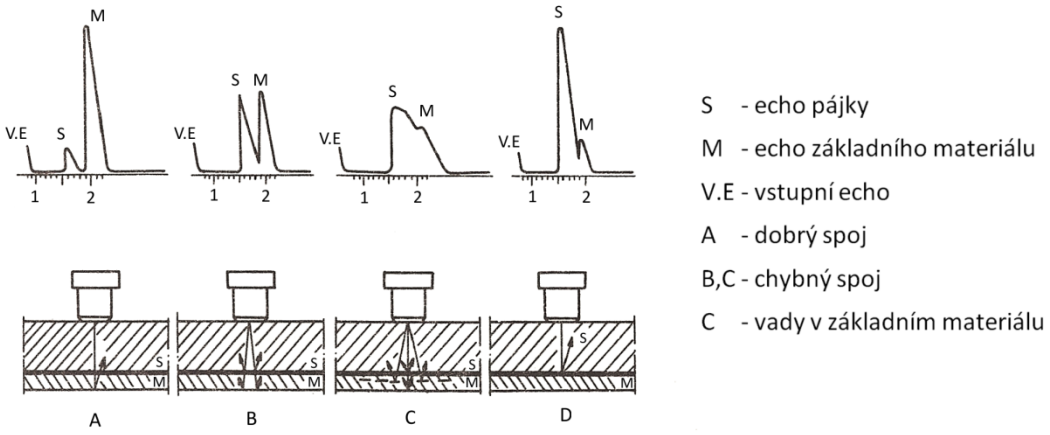
Před samotným vyhodnocováním povrchu pájených spojů je důležité odstranit zbytky tavidla, jelikož mohou zakrývat trhliny. Při samotné kontrole je nutné zaměřit se především na zatečení pájky, její přechod do spojovaného materiálu, na povrchové trhliny a vzhled spoje.

Obr. 4.3 *- Endoskop [11]*

4.2.2 Zkoušky ultrazvukem

Zkoušení materiálů pomocí ultrazvuku pracuje na principu šíření akustického vlnění zkoušeným předmětem a registrací změn vyvolaných ve zkoušeném prostředí. Je-li ve zkoušeném materiálu nějaká necelistvost nebo vada, dojde ke zpětnému odrazu ultrazvukových vln do sondy. Na obrazovce přístroje se pak tento odraz označovaný jako echo vyhodnocuje. Při zkoušení pájených spojů ultrazvukem musíme brát v úvahu, že vrstva pájky představuje velmi tenkou oblast v ohledu na tloušťku spojovaných materiálů. Situaci může ještě komplikovat tvar pájených součástí a plocha, na které je pájka nanesena.[12]

Průběh kontroly pájených spojů je na Obr. 4.4.



Obr. 4.4 - *Kontrola pájených spojů pomocí ultrazvuku [7]*

Kontrola pájených spojů pomocí ultrazvuku vyžaduje velké zkušenosti kontrolora, správné nastavení citlivosti přístroje, vhodný výběr ultrazvukové sondy a hladký povrch zkoušeného materiálu. V praxi není jednoduché dosáhnout splnění všech těchto podmínek. Z tohoto důvodu není ultrazvuková zkouška nejvýhodnější pro kontrolu pájených spojů.

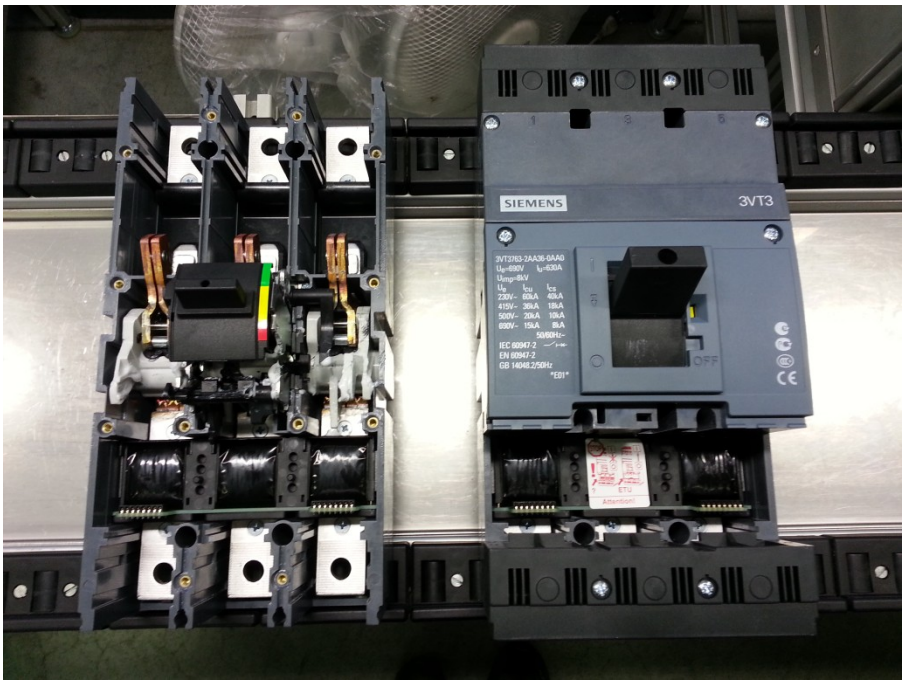
4.2.3 Zkoušky prozařovací

Pro pájené spoje lze tuto metodu označit jako dosud nejlepší známou. Výhodou je, že nejen indikuje vadu, ale z radiogramu lze určit i její velikost, polohu a charakter. Metoda je závislá na poměrné velikosti chyby, jakosti, druhu pájených materiálu a jejich tloušťce v ohledu na tloušťku vrstvy pájky. [7]

5. Vliv metod odporového tvrdého pájení na jakost spojů

5.1 Posouzení současného stavu provádění pájených spojů odporovým pájením

Odporově pájený pohyblivý vodivý pás BH 630 je akční součástí kompaktního jističe Modeion. Tyto jističe jsou určeny pro jištění elektrických zařízení se jmenovitými proudy od 12 A až do 1600 A. Chrání zařízení před přetížením i zkratem. Jsou také vhodné díky jejich méně častému spínání. Vyznačují se uživatelsky výměnnými nadproudovými spouštěmi a také širokým sortimentem stavebnicového příslušenství: spínačů, napěťových a podpěťových spouští, ručních i motorových pohonů, krytů a připojovacích sad. Dodávají se také v odnímatelném a výsuvném provedení. Z těchto důvodů jsou schopny řešit i velice náročné aplikace v průmyslových instalacích.[13]



Obr. 5.1 *- Kompaktní jistič Modeion BH 630*

<u>Pohyblivý vodivý pás BH 630 se skládá z těchto součástí:</u>

1) **Kontaktní měděný dílec**

Jedná se o specifický výlisek z elektrovodné mědi o tloušťce 4mm, který se dále osazuje dalšími prvky.

Obr. 5.2 - *Měděný výlisek*

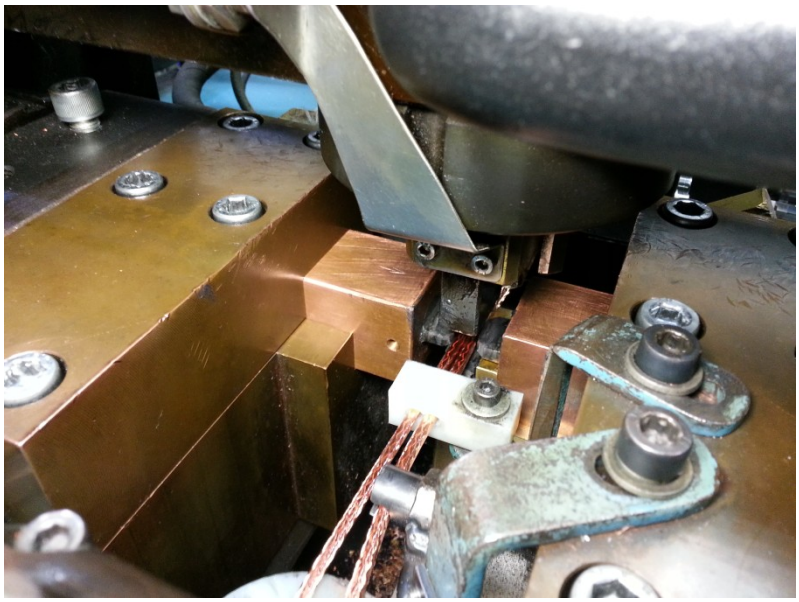
Na tento dílec se z jedné strany odporové napájí kontakt AgNi40. Jedná se o kontaktní materiál vyrobený práškovou metalurgií. Tento kontakt poté dosedá na další část kompaktního jističe Modeion, přes který se zapíná a vypíná elektrický oblouk. Druhé strany jsou patrné odporové připájená lanka z elektrovodné mědi.

Obr. 5.3 - *Měděný dílec s odporově napájeným kontaktem a lanky*

2) **Měděné lanko**

Jedná se o lanko z elektrovodné mědi s označením CU-OF-ZG BL W 8,00 12x340x0,05 31,0 SG. V lanku je 340 jednotlivých drátků s průměrem 0,05 mm a celkovým průřezem 8mm^2. Jsou dodávána na velkých cívkách, ze kterých si je podává paketovací odporový lis. Lis k sobě vždy spaketuje 2 lanka a posléze je ustřihne na požadovanou délku. Na spaketované konce měděných lanek se poté ještě odporově napájí pájka Ag15CuP jak je patrné z Obr. 5.4.

Obr. 5.4 - *Odporové spaketovaná lanka*



Obr. 5.5 *- Odporový paketovací lis*

3) Postříbřený měděný pás

Postříbřený měděný pás je pasivním členem vodivého pásu BH 630. Jeho dva menší otvory slouží k uchycení do plastového obalu jističe Modeion. Největší otvor v pásu slouží k přichycení vodiče. Pro docílení lepší elektrické vodivosti je celý pás postříbřen.

Obr. 5.6 *- Postříbřený měděný pás*

4) Pájka Ag15CuP

Ag15CuP je stříbro-měď-fosforová pájecí slitina s vynikající tekutostí. Ag15CuP nachází využití při pájení mědi na měď nebo kovů na bázi mědi jako např. bronzy. Fosfor obsažený ve slitině se chová jako tavidlo, takže při pájení mědi na měď není nutné používat další tavidlo. Ag15CuP by neměla být používána při spojování dílů, které by mohly přijít do styku s obsahem síry v provozu. Dále by neměla být použita na železné slitiny nebo slitiny niklu, vzhledem k možnosti vytvoření křehké intermetalické sloučeniny. Typické procesy zahrnují pájení

plamenem, indukční pájení a pájení odporem. Mezi typické aplikace pájky patří chladící a klimatizační zařízení a různé typy spojů v elektrotechnickém průmyslu. [14]

***Tab. 1** – Údaje o pájce Ag15CuP [14]*

Název	Složení %					Tání SOL-LIQ	Hustota	Pevnost v tahu	Odpovídající normy		
	Ag	Cu	P	Sn	Si	°c	g/cm^3	kg/mm^2	DIN 8513	EN 1044	AWS A5.8-04
Ag15CuP	15	80	5			650 - 800	8,4	54	L-Ag15P	CP 102	BCuP-5

5) Tavidlo AG4

Pro odporové pájení dílců se, i přes fosfor obsažený v pájce Ag15CuP, působící jako tavidlo, používají tavidla, která nám zaručují lepší smáčivost a pájitelnost. Vzhledem k delším skladovacím časům měděných dílců vnikají na jejich površích oxidické vrstvy, které je nutné pomocí tavidla odstranit. Při pájení dílců se tedy používá tavidlo AG4. Jedná se o tavidlo pro pájení přídavných materiálů na bázi stříbra s širokým rozsahem pracovních teplot. Dodává se ve formě pasty nebo prášku. Lze jej použít na pájení oceli, mědi a slitin mědi, niklu a niklových slitin. Využívá se pro pájení plamenem, indukční pájení nebo odporové pájení. Prášek může být smíchán s vodou za vzniku pasty. Zbytky tavidla mohou způsobovat korozi. Z tohoto důvodu musí být po pájení zbytky tavidla odstraněny štětcem nebo ponořením do studené vody.[15]

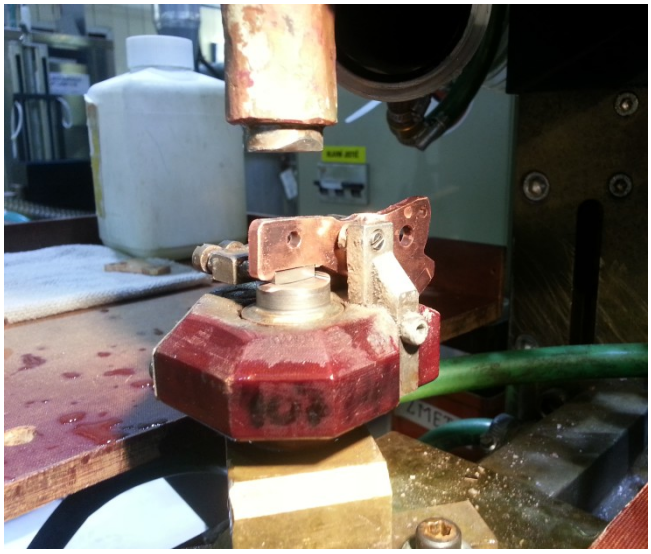
***Tab. 2** - Složení tavidla AG4 [15]*

Látka	Číslo CAS	Číslo CE
Kyselina boritá	10043-35-3	233-139-2
Oxid boritý	1303-86-2	215-125-8
Metaboritan draselný	13709-94-9	237-262-2
Tetrafluoroboritan draselný	14075-53-7	237-928-2
Tetraboritan draselný	12045-78-2	215-575-5

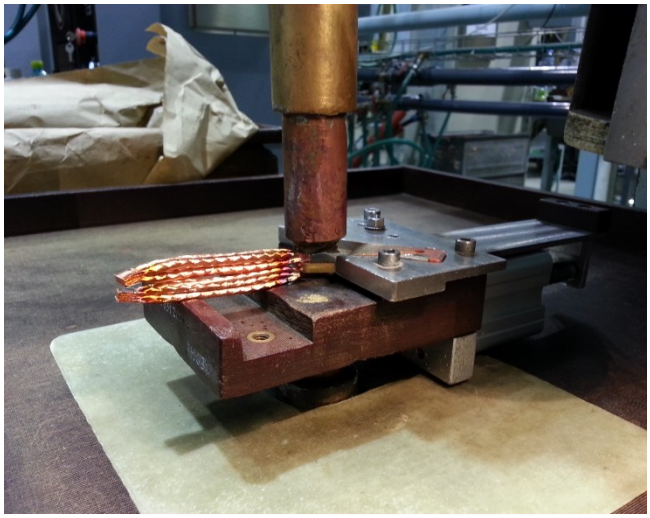
***Tab. 3 -** Vlastnosti tavidla AG4 [15]*

Vlastnosti tavidla AG4	
Teplota tavení	550 - 850 °C
Forma	prášek nebo pasta
Barva	bílá
Zápach	žádný

Princip odporového pájení:



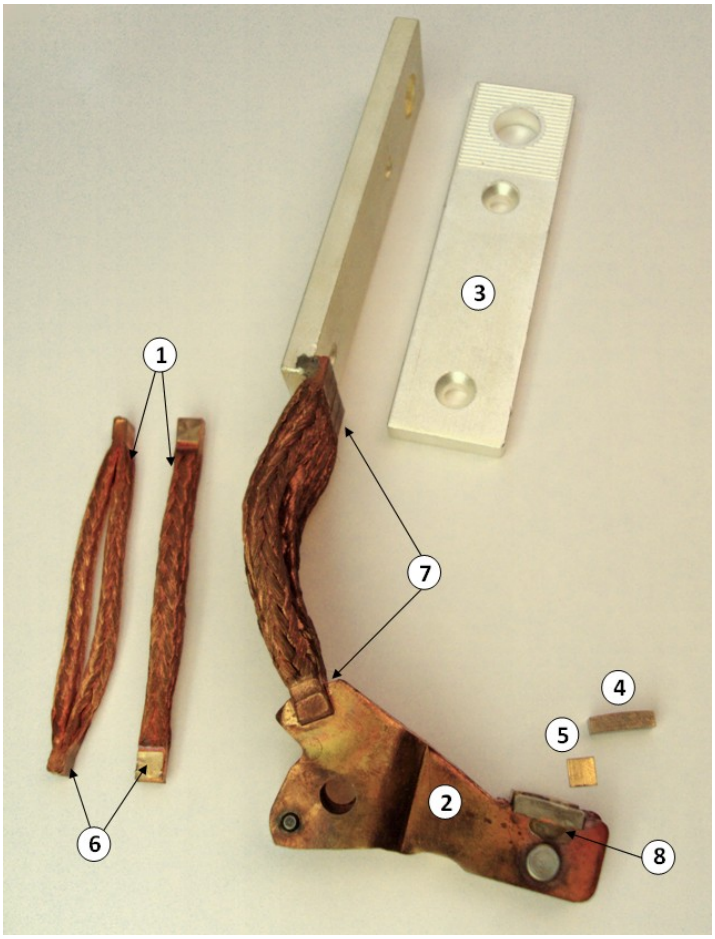
Obr. 5.7 *- Odporové pájení kontaktu AgNi40 na měděný dílec*



Obr. 5.8 - *Odporové pájení měděných lanek na měděný dílec*

Obr. 5.9 - *Odporové pájení měděných lanek na postříbřený pás*

Kompletní odporově spájený pohyblivý pás BH 630:



1- měděná lanka s odporově napájenými pájkami
2- měděný dílec s odporově napájeným kontaktem
3- postříbřený měděný pás
4- kontakt AgNi40
5- pájka Ag15CuP
6- Pájka odporově napájená na Cu lanka
7- Odporově spájené spoje s lanky
8- Odporově napájený kontakt

Obr. 5.10 - *Kompletní sestava pohyblivého vodivého pásu BH 630*

5.2 Porovnání metod odporového a odporového středofrekvenčního pájení a jejich vliv na kvalitu spojů

5.2.1 Původní odporová metoda

Dočasně používanou metodou pro odporové pájení dílců pohyblivého vodivého pásu BH 630 je klasická odporová metoda využívající konvenčních svařovacích lisů s frekvencí 50Hz. Svařovací pracoviště je stroji BP 40 od firmy VTS Bratislava.

Odporové svařovací stroje BP 40 (Obr. 5.11) jsou stroje určené pro malosériovou, ale i pro hromadnou výrobu, především pro svařování ocelí s obsahem uhlíku max. 0,3%. Ovládání a nastavení parametrů je umožněno pomocí řídící jednotky ULB 1.4 v 1.7.

Obr. 5.11 *- Odporová svářečka BP 40 s řídící jednotkou ULB 1.4 v 1.7*

Jednofázová odporová svářečka BP 40 je osazena řídící jednotkou ULB 1.4 v 1.7, která je řídicím systémem pro řízení jednofázových odporových bodovek. Má upravený program pro řízení bodovky tak, aby bylo možné v jednom cyklu svařit až 14 bodů. Kromě klasických funkcí potřebných pro nastavení sváru má následující funkce [16]:

- technologické programy pro kontrolu řídicího systému a optimalizaci technologie sváření,
- počítání počtu vykonaných svárů a po určitém svaru upravení svářecího proudu na stanovenou hodnotu,
- řízení vodního hlazení a tepelné ochrany,
- možnost propojení s PC,
- změnu parametrů lze provádět jen při odblokování uzamykatelným tlačítkem.

5.2.2 Nová středofrekvenční odporová metoda

Pro odporové pájení pohyblivého vodivého pásu BH 630 byla místo jednofázové odporové svařovací metody s frekvencí 50 Hz vybrána metoda středofrekvenčního odporového pájení využívající třífázově napájený invertor. Za tímto účelem byla vybrána Italská firma TECNA zabývající se přímo problematikou středofrekvenčních svařovacích strojů. Vzhledem k rozsahu potřebných parametrů byla vybrána středofrekvenční odporová svářečka TECNA 2118. Pomocí těchto středofrekvenčních odporových svařovacích lisů by mělo být dosaženo kratších svařovacích časů a lepší kvality odporově pájených spojů pohyblivého vodivého pásu BH 630.

Invertorová odporová svářečka TECNA 2118:

Středofrekvenční svářečka TECNA 2118 je zkonstruovaná k dosažení vysoké kvality sváření. Válec svářečky, který je vyroben z chromované oceli nám zaručuje vysoký výkon a dlouhou životnost při plném zatížení. [17]

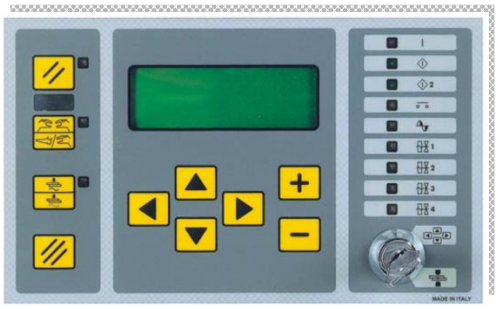
Technické parametry		
Napájení	[V/Hz]	400/500
Výkon při 50%	[kVA]	90
Max. svářecí výkon	[kVA]	142
Zkratový proud	[kA]	32
Napětí naprázdno	[V]	9,4
Jištění	[A]	100
Hmotnost	[kg]	248

Obr. 5.12 *- TECNA 2118 a její technické parametry [17]*

Kontrolní skříň pro středofrekvenční svářečku:

Kontrolní skříň pro řízení středofrekvenční svářečky obsahuje invertor, řídící jednotku TE 600 a zařízení k ochraně a bezpečnosti.

Mikroprocesorová řídicí jednotka TE 600 je určena pro invertorové odporové svařovací stroje. Řídicí jednotka ovládá části svářečky, především výkonový transformátor, kterým se reguluje proud sváření. Je možné uložit 63 různých programů sváření, z nichž se 31 může vyvolat externím ovladačem. Tyto programy se skládají z 25 nastavitelných parametrů, které kompletně popisují pracovní cyklus. Řídící jednotka kromě běžného 4 - stupňového svářecího cyklu umožňuje průběh svářecích procesů s předehřevem, dohřevem, náběhem, doběhem a pulsací. Pracuje v režimu konstantního proudu, zobrazuje proud sváření a kontroluje dosažený proud vzhledem k nastaveným hodnotám. [17]



Parametr	Jednotka	Rozsah hodnot
Předtisk	cyklů	01 - 99
Stisk	cyklů	01 - 99
Prodleva před zvýš. přítlaku	cyklů	00 - 99
Přítlak při sváření	[bar]	00,5 - 10.0
Čas předehřevu	[ms]	0000 - 1000
Proud předehřevu	[kA]	001.0 - 120
Čas chladnutí 1	[ms]	0000 - 1000
Čas náběhu	[ms]	000 - 500
Čas sváření 1	[ms]	0001 - 1000
Proud sváření 1	[kA]	001.0 - 120.0
Čas chladnutí 2	[ms]	0000 - 1000
Počet impulsů	-	0 - 5
Čas sváření 2	[ms]	0000 - 1000
Proud sváření 2	[kA]	001.0 - 120.0
Čas chladnutí 3	[ms]	0000 - 1000
Čas sváření 3	[ms]	0000 - 1000
Proud sváření 3	[kA]	001.0 - 120
Čas doběhu proudu	[ms]	000 - 500
Čas chladnutí 4	[ms]	0000 - 1000
Čas dohřevu	[ms]	0000 - 1000
Proud dohřevu	[kA]	001.0 - 120.0
Přidržení	cyklů	03 - 99
Prodleva	cyklů	00 - 99
Minimální proud	[kA]	001.0 - 120.0
Maximální proud	[kA]	001.0 - 120.0

Obr. 5.13 *- Řídící jednotka TE 600 a její parametry [17]*

5.3 Provedení pájených spojů oběma metodami odporového pájení

Provedení odporově pájených spojů bylo realizováno na všech spojích, vyskytujících se na pohyblivém vodivém pásu BH 630. Jedná se konkrétně o tyto odporové spájené spoje:

1. Spoj měděného dílce s kontaktem AgNi40
2. Spoj měděného dílce s měděnými lanky
3. Spoj postříbřeného pásu s měděnými lanky

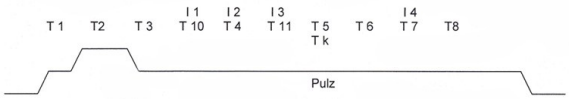
Každý spoj byl nejprve proveden klasickou odporovou metodou s frekvencí 50 Hz na stroji BP 40 s řídící jednotkou ULB 1.4 v 1.7. Před samotným odporovým pájením muselo dojít nejprve k seřízení strojních přípravků, zapojení chlazení zařízení a ke kontrole elektrod. Spájené vzorky se kontrolují zvolenými zkušebními metodami. Na základě výsledků zkoušek se svařovací parametry upravují, dokud není spoj vyhovující. Stejný postup byl zvolen při realizaci odporově pájených spojů pomocí metody s invertorovým zdrojem. Pro zhotovení spojů se ovšem využívalo stroje TECNA 2118 s jeho řídící jednotky TE 600.

5.3.1 Spoj měděného dílce s kontaktem AgNi40

Pro zjednodušení manipulace během pájení je již kontakt AgNi40 opatřen ze strany pájené plochy pájkou Ag15CuP.

Původní metoda odporového pájení

PÁJECÍ PARAMETRY



Čas	Operace	Period	Výkon [%]	Poznámka
T 1	1. přítlak (zavírání)	99		
T 2	2. přítlak (kalibrace)	99		
T 3	Pokles na sílu (dotlak)	10		
T 10	Svah proudu - nahoru (z I1 do I2)	2	30	
T 4	Svařovací čas a proud (I2)	43	52	
T 11	Svah proudu - dolů (z I2 do I3)	3	30	
T 5	Mezičas pulzace	3		
T k	Předstih kování	0		
T 6	Kování	2		
T 7	Žíhání proudem (I4)	0	20	
T 8	Mezičas u řady bodů	90		
Pulz	Počet pulzů (T 10 + T 4 + T 11 + T 5)	2		
Horní elektroda - podle výkesu		Molybden		
Dolní elektroda - podle výkresu		Molybden		
Pracovní tlak: 0,55 MPa ; Síla: 6,5 kN				

Obr. 5.14 *- Pájení měděného dílce s kontaktem AgNi40 na stroji BP40*

Nová metoda odporového pájení

Tab. 4: *Parametry pájení měděného dílce s kontaktem AgNi40*

Spoj měděného dílce s kontaktem AgNi40				
Anglický název	**Český název**	**Jednotky**	**Rozsah**	**Nastaveno**
Work mode	Pracovní režim	-	IK	IK
Stroke	Zdvih	-	Short	Short
Squeeze 1	Předstisk	[per]	1 – 99	95
Squeeze	Stisk	[per]	1 – 99	95
Pre-weld	Čas předehřevu	[ms]	1 – 1000	200
Pre-current	Proud předehřevu	[kA]	1 – 120	11
Cold 1	Čas chladnutí 1	[ms]	0 – 1000	75
Slope up	Čas náběhu	[ms]	0 – 500	0
Weld 1	Čas sváření 1	[ms]	1 – 1000	550
Current 1	Proud sváření 1	[kA]	1 – 120	15
Cold time 2	Čas chladnutí 2	[ms]	0 – 1000	0
N. pulses	Počet impulsů		0 – 5	1
Weld 2	Čas sváření 2	[ms]	0 – 1000	15
Current 2	Proud sváření 2	[kA]	1 – 120	6
Cold time 3	Čas chladnutí 3	[ms]	0 – 1000	0
Weld 3	Čas sváření 3	[ms]	0 – 1000	0
Current 3	Proud sváření 3	[kA]	1 – 120	1
Slope down	Čas doběhu proudu	[ms]	0 – 500	0
Cold time 4	Čas chladnutí 4	[ms]	0 – 1000	0
Post-weld	Čas dohřevu	[ms]	0 – 1000	0
Post- current	Proud dohřevu	[kA]	1 – 120	1
Hold time	Přidržení	[per]	3 – 99	8
Off time	Prodleva	[per]	0 – 99	0
Curr min.	Minimální proud	[kA]	1 – 120	1
Curr max.	Maximální proud	[kA]	1 – 120	1
Pressure	Tlak	[Mpa]	0,2	
Elektrode top	Elektroda vrchní	Molybden		
Elektrode bottom	Elektroda dolní	Molybden		

Obr. 5.15 *- Pájení měděného dílce s kontaktem AgNi40 na stroji TECNA 2118*

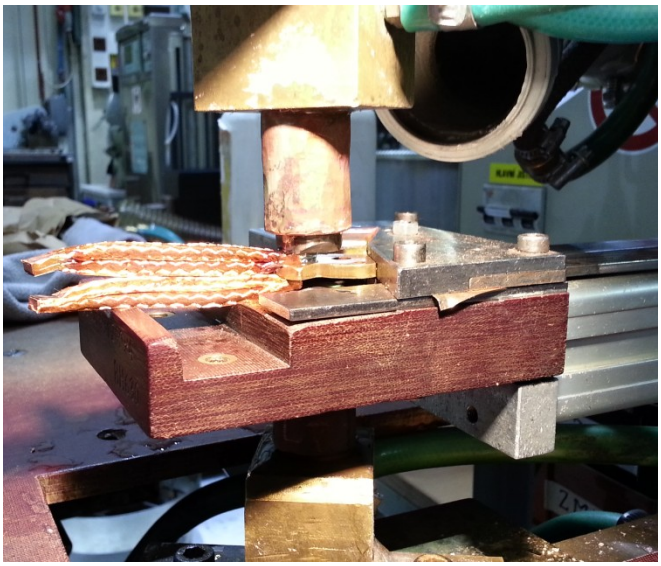
5.3.2 Spoj měděného dílce s měděnými lanky

Pro lepší manipulaci byla již předem na měděná lanka odporově napájena pájka Ag15CuP.

Nová metoda odporového pájení

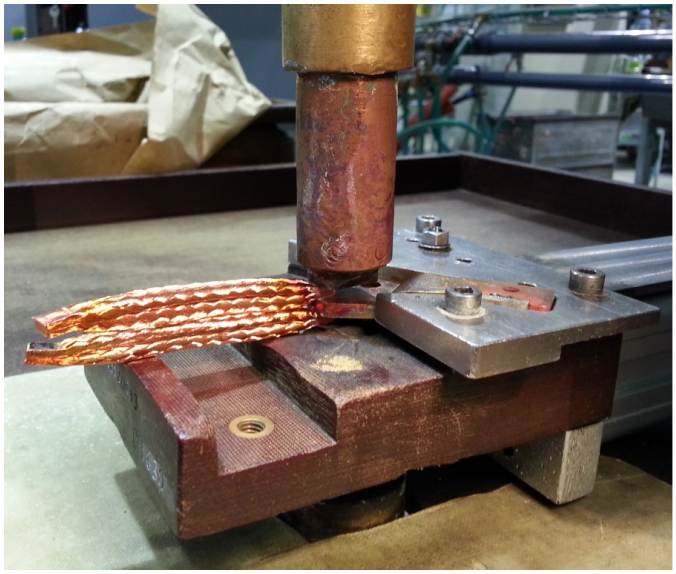
Tab. 5: *Parametry pájení měděného dílce s měděnými lanky*

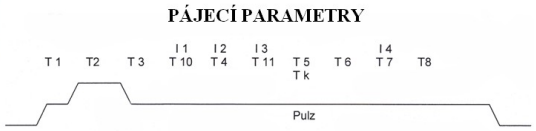
Spoj měděného dílce s měděnými lanky				
Anglický název	**Český název**	**Jednotky**	**Rozsah**	**Nastaveno**
Work mode	Pracovní režim	-	IK	IK
Stroke	Zdvih	-	Short	Short
Squeeze 1	Předstisk	[per]	1 – 99	95
Squeeze	Stisk	[per]	1 – 99	95
Pre-weld	Čas předehřevu	[ms]	1 – 1000	50
Pre-current	Proud předehřevu	[kA]	1 – 120	7
Cold 1	Čas chladnutí 1	[ms]	0 – 1000	30
Slope up	Čas náběhu	[ms]	0 – 500	0
Weld 1	Čas sváření 1	[ms]	1 – 1000	550
Current 1	Proud sváření 1	[kA]	1 – 120	10,5
Cold time 2	Čas chladnutí 2	[ms]	0 – 1000	0
N. pulses	Počet impulsů		0 – 5	0
Weld 2	Čas sváření 2	[ms]	0 – 1000	0
Current 2	Proud sváření 2	[kA]	1 – 120	1
Cold time 3	Čas chladnutí 3	[ms]	0 – 1000	0
Weld 3	Čas sváření 3	[ms]	0 – 1000	0
Current 3	Proud sváření 3	[kA]	1 – 120	1
Slope down	Čas doběhu proudu	[ms]	0 – 500	0
Cold time 4	Čas chladnutí 4	[ms]	0 – 1000	0
Post-weld	Čas dohřevu	[ms]	0 – 1000	0
Post- current	Proud dohřevu	[kA]	1 – 120	1
Hold time	Přidržení	[per]	3 – 99	8
Off time	Prodleva	[per]	0 – 99	0
Curr min.	Minimální proud	[kA]	1 – 120	1
Curr max.	Maximální proud	[kA]	1 – 120	1
Pressure	Tlak	[Mpa]	0,09	
Elektrode top	Elektroda vrchní	Molybden		
Elektrode bottom	Elektroda dolní	Molybden		



Obr. 5.16 - *Pájení měděného dílce s měděnými lanky na stroji TECNA 2118*

Původní metoda odporového pájení





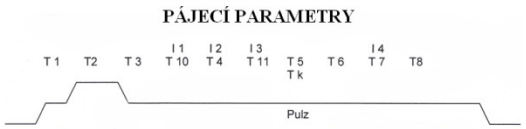
Čas	Operace	Period	Výkon [%]	Poznámka
T 1	1. přítlak (zavírání)	99		
T 2	2. přítlak (kalibrace)	99		
T 3	Pokles na sílu (dotlak)	10		
T 10	Svah proudu - nahoru (z I1 do I2)	0	25	
T 4	Svařovací čas a proud (I2)	65	58	
T 11	Svah proudu - dolů (z I2 do I3)	0	25	
T 5	Mezičas pulzace	8		
T k	Předstih kování	0		
T 6	Kování	20		
T 7	Žíhání proudem (I4)	0	25	
T 8	Mezičas u řady bodů	20		
Pulz	Počet pulzů (T 10 + T 4 + T 11 + T 5)	2		
Horní elektroda - podle výkresu		Molybden		
Dolní elektroda - podle výkresu		Molybden		
Pracovní tlak: 0,25 MPa ; Síla: 3 kN				

Obr. 5.17 *- Pájení měděného dílce s měděnými lanky na stroji BP40*

5.3.3 Spoj postříbřeného pásu s měděnými lanky

Pro zjednodušení zakládání dílců do přípravku jsou měděná lanka opět na svých koncích opatřena pájkou. Postříbřený pás se v místě kontaktu s měděnými lanky upravuje broušením. Touto mechanickou úpravou povrchu se dociluje lepší přilnavosti pájky k pájenému místu.

Původní metoda odporového pájení



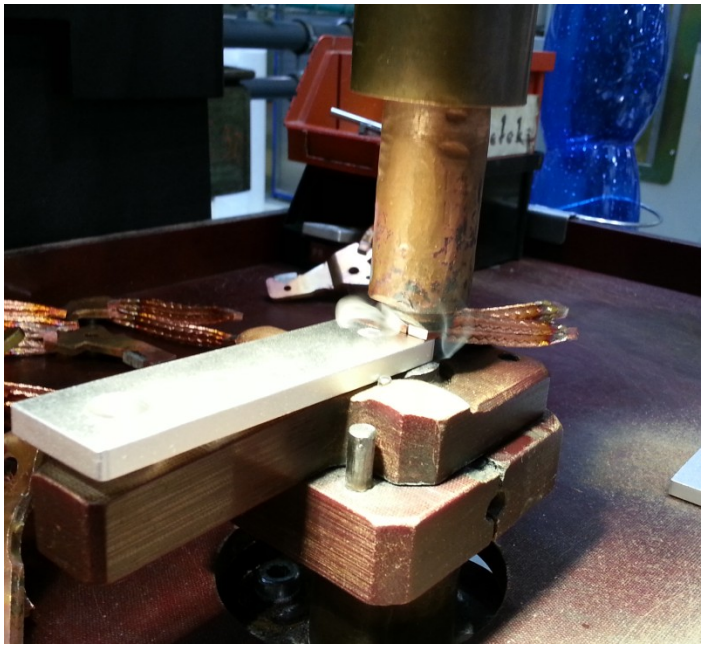
Čas	Operace	Period	Výkon [%]	Poznámka
T 1	1. přítlak (zavírání)	99		
T 2	2. přítlak (kalibrace)	99		
T 3	Pokles na sílu (dotlak)	10		
T 10	Svah proudu - nahoru (z I1 do I2)	12	55	
T 4	Svařovací čas a proud (I2)	70	80	
T 11	Svah proudu - dolů (z I2 do I3)	12	55	
T 5	Mezičas pulzace	3		
T k	Předstih kování	0		
T 6	Kování	2		
T 7	Žíhání proudem (I4)	0	20	
T 8	Mezičas u řady bodů	90		
Pulz	Počet pulzů (T 10 + T 4 + T 11 + T 5)	3		
Horní elektroda - podle výkresu		Molybden		
Dolní elektroda - podle výkresu		Molybden		
Pracovní tlak: 0,6 MPa ; Síla: 8 kN				

Obr. 5.18 *- Pájení postříbřeného pásu s měděnými lanky na stroji BP 40*

Nová metoda odporového pájení

Tab. 6: *Parametry pájení postříbřeného pásu s měděnými lanky*

Spoj postříbřeného pásu s měděnými lanky				
Anglický název	**Český název**	**Jednotky**	**Rozsah**	**Nastaveno**
Work mode	Pracovní režim	-	IK	IK
Stroke	Zdvih	-	Short	Short
Squeeze 1	Předstisk	[per]	1 – 99	99
Squeeze	Stisk	[per]	1 – 99	99
Pre-weld	Čas předehřevu	[ms]	1 – 1000	90
Pre-current	Proud předehřevu	[kA]	1 – 120	10
Cold 1	Čas chladnutí 1	[ms]	0 – 1000	40
Slope up	Čas náběhu	[ms]	0 – 500	0
Weld 1	Čas sváření 1	[ms]	1 – 1000	740
Current 1	Proud sváření 1	[kA]	1 – 120	18.8
Cold time 2	Čas chladnutí 2	[ms]	0 – 1000	0
N. pulses	Počet impulsů		0 – 5	0
Weld 2	Čas sváření 2	[ms]	0 – 1000	0
Current 2	Proud sváření 2	[kA]	1 – 120	1
Cold time 3	Čas chladnutí 3	[ms]	0 – 1000	0
Weld 3	Čas sváření 3	[ms]	0 – 1000	0
Current 3	Proud sváření 3	[kA]	1 – 120	1
Slope down	Čas doběhu proudu	[ms]	0 – 500	0
Cold time 4	Čas chladnutí 4	[ms]	0 – 1000	0
Post-weld	Čas dohřevu	[ms]	0 – 1000	0
Post- current	Proud dohřevu	[kA]	1 – 120	0
Hold time	Přidržení	[per]	3 – 99	5
Off time	Prodleva	[per]	0 – 99	0
Curr min.	Minimální proud	[kA]	1 – 120	1
Curr max.	Maximální proud	[kA]	1 – 120	1
Pressure	Tlak	[Mpa]	0.09	
Elektrode top	Elektroda vrchní	Molybden		
Elektrode bottom	Elektroda dolní	Molybden		



Obr. 5.19 *- Pájení postříbřeného pásu s měděnými lanky na stroji TECNA 2118*

5.4 Posouzení pájených spojů

Odporově pájené spoje pohyblivého vodivého pásu BH 630 musí vykazovat užitné vlastnosti, které jsou od něj požadovány. Při použití nevhodné pájky nebo tavidla či nedodržení podmínek pájení v kombinaci s nevhodně zvolenými parametry mohou vznikat v odporově pájených spojích různé typy vad. Tyto defekty poté ovlivňují užitné vlastnosti pájeného spoje. Velikost, počet a druh vad je rozhodující pro pevnostní charakteristiky a elektrickou vodivost pájených spojů. Přítomnost vad v odporově pájených spojích lze zjisti pomocí nedestruktivních a destruktivních kontrol.

Vady pájených spojů:

Studený spoj

Tento typ spojení je nepřípustný a nevyhovuje pevnostně ani z hlediska elektrické vodivosti spoje. Vniká při ohřátí pájené plochy na teplotu nižší, než je teplota pájecí. Na Obr. 5.20 je patrné, že pájka nesmáčí kolem kontaktu AgNi40 a lze tento spoj označit za studený.

Obr. 5.20 - *Studený spoj*

Nedostatečně vyplněný spoj

Vznik těchto vad souvisí s velmi malou mezerou, krátkou dobou pájení, malým množstvím pájky nebo nízkou pájecí teplotou. Nedostatečně vyplněný spoj je vidět na Obr. 5.21. Zde došlo k nedostatečnému vyplnění mezery vlivem nízké pájecí teploty.

Obr. 5.21 *- Nedostatečně vyplněný spoj*

Přehřátý spoj

Přehřátý spoj vzniká při vysoké pájecí teplotě. Vysoké pájecí teploty způsobují vytečení pájky ze spoje, spálení tavidla či některých prvků pájky. Vliv vysokých teplot na odporově spájený spoj je patrný z Obr. 5.22.

Obr. 5.22 - *Přehřátý spoj*

Pájkou nesmáčená místa

Vznikají na pájecích plochách nejčastěji nevhodnou pájecí teplotou, neúčinným tavidlem nebo velkým znečištěním pájené plochy povrchovými oxidy a nečistotami.

Nedostatečný přechod pájky

Špatný přechod pájky do spojovaného materiálu bývá způsobován nedostatečným množstvím pájky, aplikací nevhodné pájky nebo malou mezerou.

Dutiny

Tento druh vady vzniká v důsledku smršťování. Princip vzniku je takový, že pájka na základním materiálu tuhne rychleji, než v jejím středu což má za následek vznik dutin.

Trhliny

Velmi často vznikají při velmi rychlém ochlazování pájeného spoje nebo při nevhodné konstrukční úpravě spoje vlivem vysoké koncentrace napětí.

5.5 Porovnání obou metod pájení s ohledem na produktivitu a kvalitu spojů

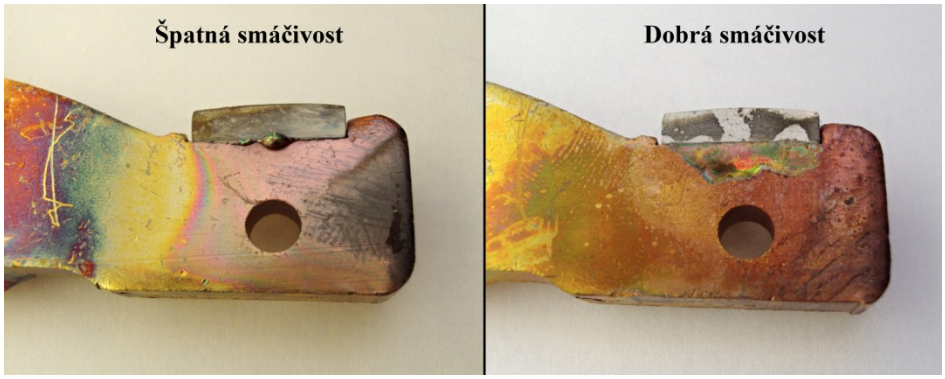
Pohyblivý odporově spájený vodivý pás BH 630 se pro docílení velmi dobré vodivosti a požadovaných mechanických vlastností musí podrobovat stále kontrole pájených spojů. Nevyhovujícím spojům lze předcházet důslednou a stálou kontrolou. Kontrolovat spoje lze buď vizuálně, tedy kontrolou nedestruktivní nebo celou řadou kontrol destruktivních, při které ovšem dochází ke znehodnocení pájených součástí. V případě pásu BH 630 lze kontrolu spojů provést ve třech oblastech:

1. Spoj měděného dílce s kontaktem AgNi40
2. Spoj měděného dílce s měděnými lanky
3. Spoj postříbřeného pásu s měděnými lanky

5.5.1 Spoj měděného dílce s kontaktem AgNi40

Vizuální kontrola

Jedná se o typ kontroly na odporově pájeném spoji. Při příslušném osvětlení za použití lupy nebo pouhým okem nesmí být viditelné znaky studeného nebo přehřátého stoje či viditelné póry a trhliny. Vzhledem ke zkušenostem lze tvrdit, že pokud pájka smáčí kontakt AgNi40 po celém jeho obvodu, spoj vždy vyhoví i při podrobení spoje následným destruktivním kontrolám. Nejnižším požadavkem na vyhovění spoje je smáčivost obvodu kontaktu v 75 %.

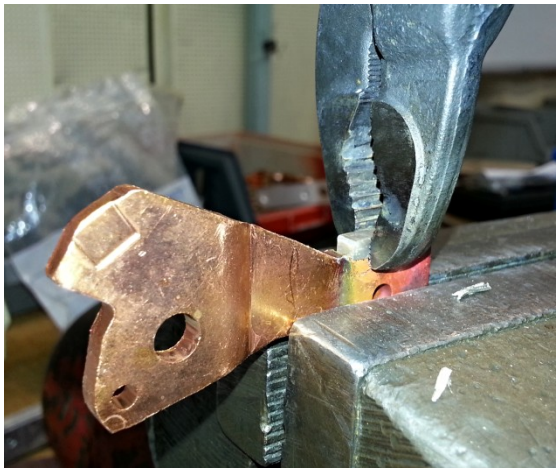


Obr. 5.23 *- Vizuální kontrola spoje měděného dílce s kontaktem AgNi40*

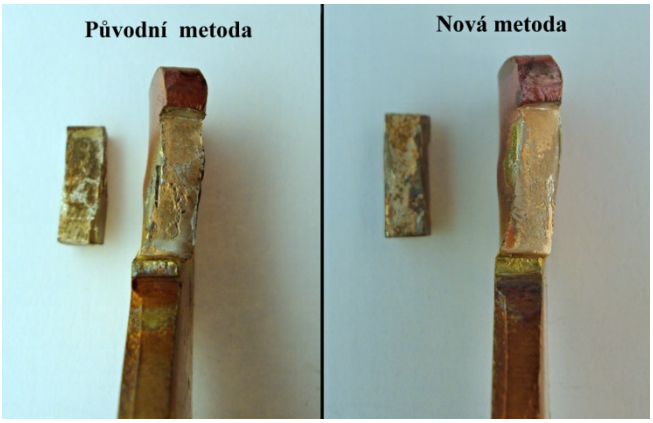
U obou metod odporového pájení docházelo na všech zkoušených vzorcích k dobrému roztékání a smáčení kontaktu po celém jeho obvodu jako v pravé části Obr. 5.23 kde zobrazený vyhovující spoj.

Odlomení kontaktu AgNi40

Tato destruktivní zkouška spoje je realizována pomocí svěráku a kleští. Dílec se upne do svěráku a pomocí kleští se kontakt odlomí. Princip je patrný z Obr. 5.24. Po odlomení se vizuálně kontroluje pájená plocha. Na ploše musí být jasně viditelné zbytky kontaktu AgNi40. V případě že by na měděném dílci nebyly zbytky kontaktu či byly patrné jiné vady jako bubliny či póry je spoj nevyhovující.



Obr. 5.24 *- Princip odlomení kontaktu AgNi40*



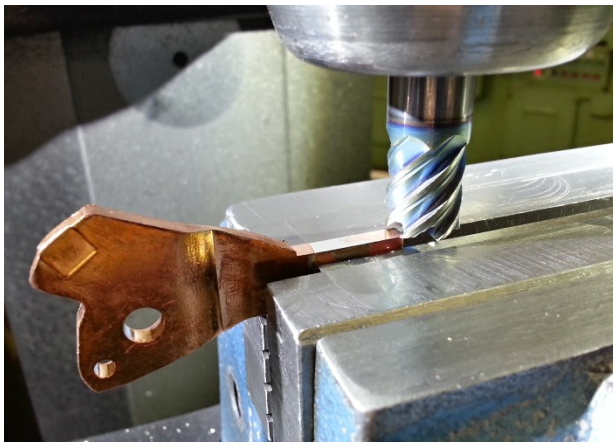
Obr. 5.25 *- Výsledek zkoušky odlomením*

Výsledek zkoušky odlomením kontaktu je patrný z Obr. 5.25. Na obou vzorcích jsou jasně patrné zbytky kontaktu na pájené ploše. Vzorek provedený na stroji s frekvencí 50 Hz vyhověl stejně jako vzorek zhotovený středofrekvenční odporovou metodou. Spoj zhotovený novou metodou však vykazoval větší množství kontaktu na měděné ploše dílce.

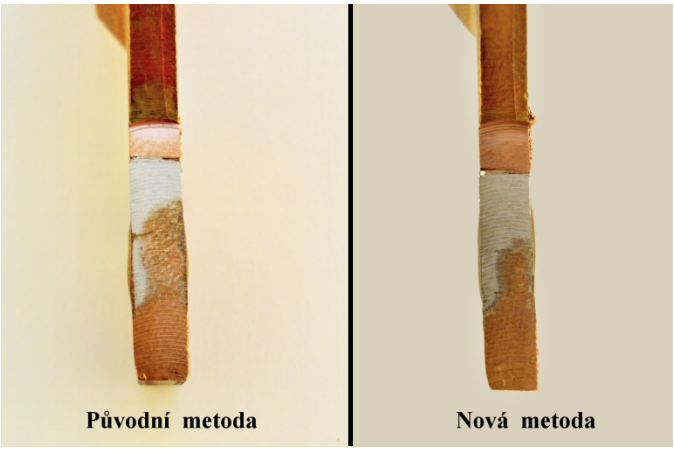
Odfrézování kontaktu AgNi40

Pokud není destruktivní zkouška odlomení kontaktu průkazná, tak se kontakt odfrézuje do přechodové části (místo, kde je spoj tvořen pájkou). Tato metoda je však náročná na přesnost frézování z důvodu velmi úzké vrstvy přechodové oblasti. Není téměř možné dosáhnout přechodové vrstvy po celé její délce, jelikož při vysekávání dílců dochází k malé deformaci dílce, která se projeví při odfrézování i v případě, že dílec upneme ve svěráku zcela přesně.

Po odfrézování kontaktu povrch kontrolujeme vizuálně. Musí být bez pórů, či znaků studeného nebo přehřátého spoje.



Obr. 5.26 *- Princip odfrézování kontaktu*

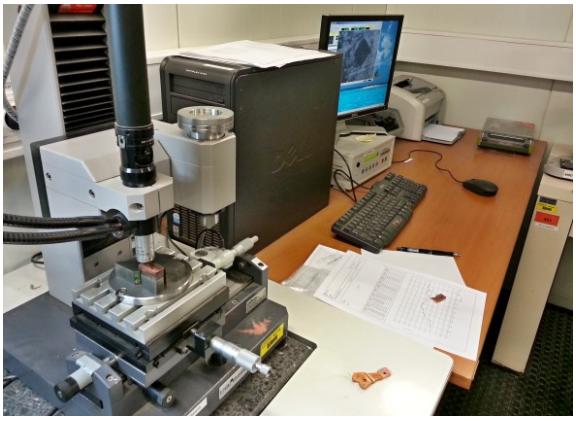


Obr. 5.27 *- Výsledek zkoušky odfrézování*

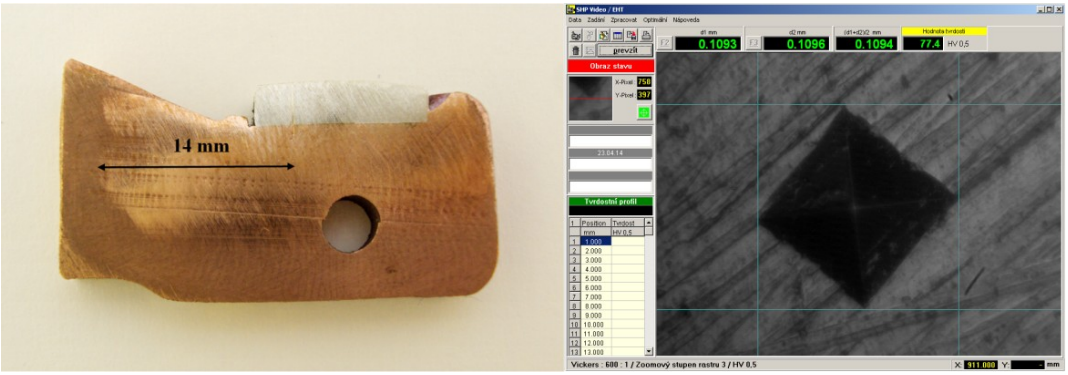
Na žádném ze zkoušených vzorků, nebyly nalezeny znaky studených nebo přehřátých spojů či pórů a jiných defektů.

Mikrotvrdost

Další možnou zkouškou měděného dílce s kontaktem AgNi40 je měření mikrotvrdosti Vickersovou zkouškou. Samotný vzorek se nejprve obrábí s ohledem na to, že nesmí být tepelně ovlivněn z důvodů případného zkreslení měřených hodnot. Pro lepší viditelnost vtisků v materiálu pod mikroskopem a tím i větší přesnost měřených a vypočtených hodnot se povrch vzorků upravuje broušením. Na měřícím pracovišti se na mikrotvrdoměru Bai zeiss nastaví zatížení HV 0,5. Pro měření se zvolí stejný výchozí bod u všech zkoušených vzorků, který se mechanicky označí. Tento bod nalezneme pomocí mikroskopu a v příslušné vzdálenosti od něj začínáme provádět vpichy na délce 14mm s krokem po 1 mm ve směru tepelného ovlivnění. Vpichy se provádí po dobu 10s se zatížením HV 0,5. Plocha vzorku je snímána přes mikroskop kamerou s vysokým rozlišením, která umožňuje dobře snímat měřený dílec a snadno pomocí softwaru označit velikost vpichu. Software podle námi označené velikosti vpichu určí hodnotu mikrotvrdosti a zapíše jí do tabulky. Tyto hodnoty jsou v závislosti na vzdálenosti od počátku měření pro větší názornost vynášeny do grafů.



Obr. 5.28 *- Měřící pracoviště*



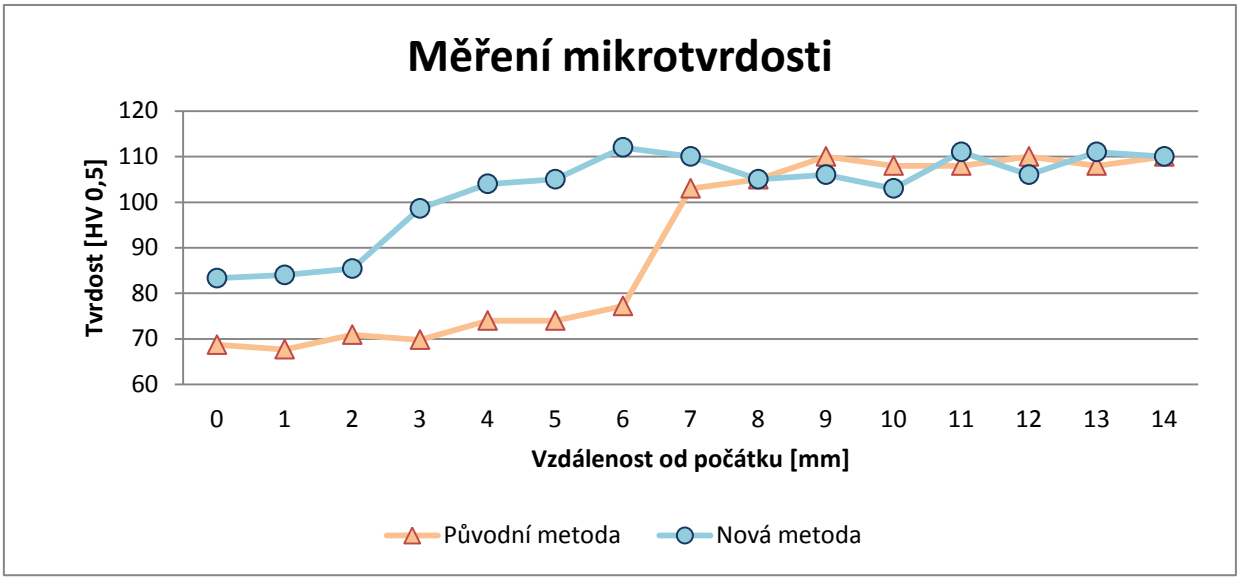
Obr. 5.29 *- Tvar a velikost měřený vzorků a softwarové prostředí pro měření tvrdosti*

Hodnoty naměřené Vickersovou zkouškou na jednotlivých měděných dílcích, jsou uvedeny v Tab. 3 a následně jsou vyneseny v grafu 1.

Tab. 7 - *Hodnoty naměřené zkouškou mikrotvrdosti*

Porovnání tvrdosti měděného dílce po odporovém pájení původní a novou metodou																
Vzdálenost od počátku	[mm]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Původní metoda	[HV 0,5]	68,7	67,7	70,9	69,8	74	74	77,2	103	105	110	108	108	110	108	110
Nová metoda	[HV 0,5]	83,3	84	85,4	98,6	104	105	112	110	105	106	103	111	106	111	110

Graf 8 - *Měření mikrotvrdosti*



Z výsledku zkoušky je patrné, že nová středofrekvenční metoda má mnohem menší tepelný vliv na odporově pájené materiály než metoda 50 Hz. Dokazují to hodnoty naměřených tvrdostí HV 0,5, kdy u nové metody dosahujeme již v prvních bodech měření vyšších hodnot tvrdosti a přechod do oblasti, kde měď není ovlivněná procesem odporového pájení je mnohem rychlejší. U původní metody s frekvencí 50 Hz jsou v úvodu naměřeny hodnoty tvrdosti s nižšími hodnotami než u nové metody. Z hodnot je také zřetelné, že původní metoda ovlivňuje materiál v širší oblasti, což je dáno především delšími pájecími časy.

Z pohledu měření mikrotvdosti odporově pájených měděných dílců s kontakty AgNi40 lze říci, že pájení spojů zhotovených pomocí zařízení se středofrekvenčním zdrojem dosahujeme lepších hodnost mikrotvrdosti a tím menšího stupně tepelného ovlivnění součásti.

5.5.2 Spoj měděného dílce s měděnými lanky

Vizuální kontrola

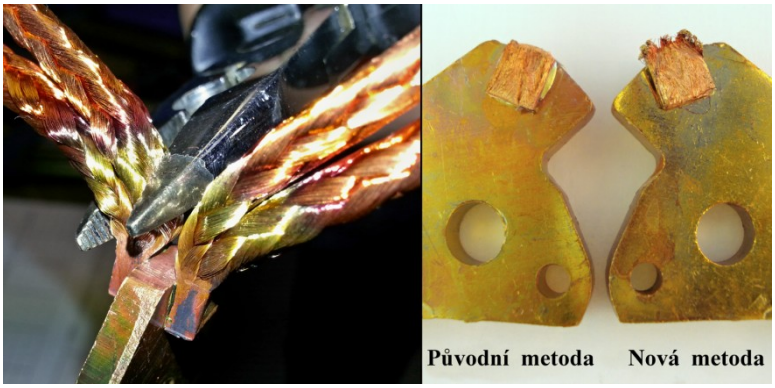
Za předepsaného osvětlení za použití lupy nebo pouhým okem nesmí být viditelné znaky studeného nebo přehřátého spoje či viditelné póry a trhliny. Vzhledem ke zkušenostem lze říci, že pokud pájka smáčí okolo místa styku ocelového lanka s měděným kontaktem, spoj vždy vyhoví i při podrobení spoje následným destruktivním kontrolám.

Obr. 5.30 *- Vizuální kontrola spoje měděného dílce s měděnými lanky*

Provedená vizuální kontrola potvrdila vyhovující pájené spoje.

Odvalení lanka od měděného dílce

Tento způsob kontroly spoje je destruktivní. Princip spočívá v upnutí měděného dílce do svěráku a následném odvalení lanka pomocí kleští. Nesmí dojít k odloupnutí lanka od měděného dílce. Spoj by se měl přerušit mimo pájenou oblast a zbytky odtrženého lanka by měly stále zůstat na měděném dílci.



Obr. 5.31 *- Princip odvalu lanka a výsledky zkoušek*

Všechny odporově pájené vzorky podrobené kontrole odvalu lanka od měděného dílce vyhověly.

5.5.3 Spoj postříbřeného měděného pásu s měděnými lanky

Vizuální kontrola

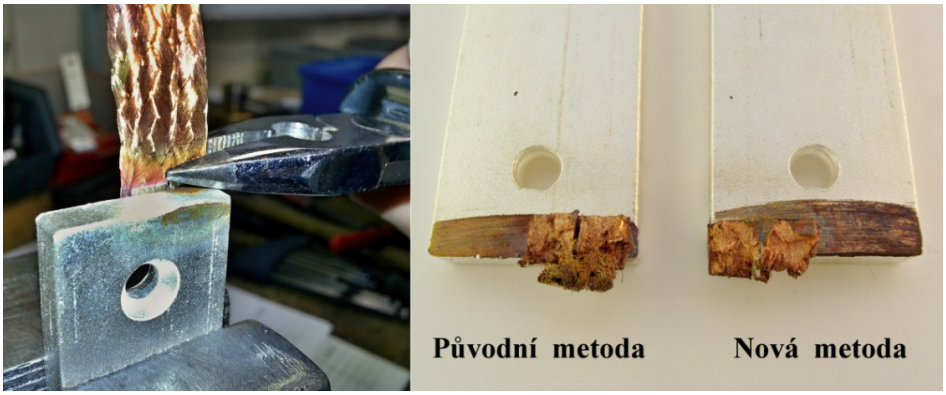
Princip je stejný jako u předchozích vizuálních kontrol. Nesmí být viditelné znaky studeného, přehřátého nebo jinak vadného spoje.

Obr. 5.32 *- Vizuální kontrola postříbřeného pásu s měděnými lanky*

Provedená zkouška potvrdila, že z hlediska vizuální kontroly, lze pomocí obou metod dosáhnout vyhovujících pájených spojů.

Odvalení lanka od postříbřeného pásu

Tato destruktivní kontrola spočívá upnutí postříbřeného měděného pásu do svěráku a následném odvalení lanka pomocí kleští. Nesmí dojít k odloupnutí lanka od měděného dílce. Spoj by se měl přerušit mimo pájenou oblast a zbytky odtrženého lanka by měly stále držet na měděném dílci.



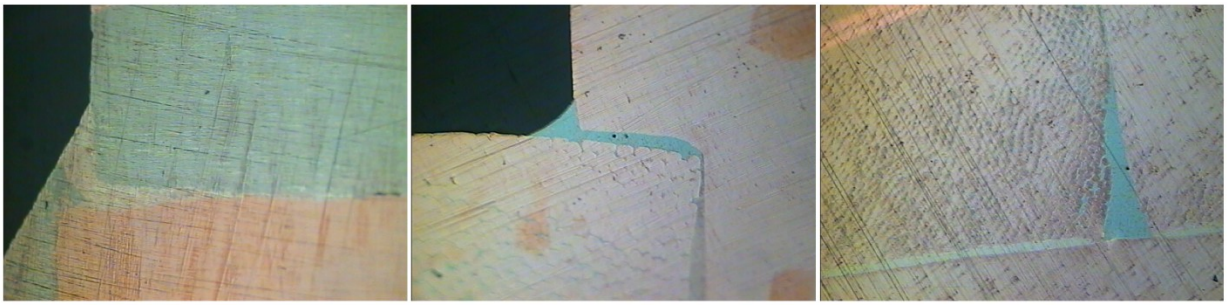
Obr. 5.33 *- Princip a výsledek zkoušky odvalením lanka*

Na žádném ze zkoušených vzorků nebyl zjištěn nevyhovující pájený spoj. U spojů zhotovených středofrekvenční metodou bylo vždy větší množství zbytků odtrženého lanka.

5.5.4 Posouzení makrostruktury pájených spojů

Vzorky pro provedení zkoušky se odebírají mechanickým dělením, kdy nesmí dojít k tepelnému ovlivnění povrchu. Odebrané vzorky se následně zalívají do dvousložkové směsi ViaFix, kde dochází k jejich fixaci. Vzorky jsou připraveny broušením pomocí kotoučů SiC Foil bez přidaných adheziv s postupující zrnitostí 500 / 1200 / 2000 / 4000. Závěrečné finišování je realizováno leštícím suknem bez adheziv. Vzorky se po každé změně zrnitosti oplachují vodou.

Snímky byly zhotoveny pomocí kamery s vysokým rozlišením připojené k mikroskopu.



A B C

Obr. 5.34 - *Snímky spojů zhotovených novou metodou pájení (50x)*
A – měděný dílec s kontaktem AgNi40, B – měděný dílec s měděnými lanky, C – postříbřený pás s měděnými lanky

D E F

Obr. 5.35 - *Snímky spojů zhotovených původní metodou pájení (50x)*
D – měděný dílec s kontaktem AgNi40, E – měděný dílec s měděnými lanky, F – postříbřený pás s měděnými lanky

Pomocí obou svařovacích metod lze dosáhnou vyhovujících spojů, ovšem u zařízení s frekvencí 50Hz bylo na všech vzorcích pozorováno větší množství pórů v roztavené pájce, což se přisuzuje delším pájecím časům a tím většímu odpařování prvků.

6. Závěr

Práce se zabývá porovnáváním klasické metody pro odporové pájení dílců o frekvenci 50Hz s metodou využívající třífázově napájený invertorový zdroj a jejich vlivem na jakost spojů.

Z pohledu kvality spoje lze tvrdit, že při aplikaci obou typů zdrojů lze dosáhnout vyhovujících spojů. Středofrekvenční zdroj díky kratším výrobním časům méně ovlivňuje pájené materiály, což jednoznačně dokazuje měření mikrotvrdosti odporově pájených dílců. Výsledky zkoušky poukazují na skutečnost, že použití invertorového zdroje pro odporové pájení dílců vede k nižšímu vyžíhání materiálu a tím k lepším mechanickým vlastnostem v oblasti spoje.

Díky kratším pájecím časům středofrekvenčního zařízení dochází i k menšímu tepelnému namáhání elektrod a tím menším nárokům na nutnost vysokého výkonu chladícího zařízení. Z důvodu opakovatelnosti procesu jsou středofrekvenční stroje vybaveny sledováním množství průtoku chladicí kapaliny tak, aby nedošlo ke spuštění pájecího procesu bez chlazení elektrod. Elektrody se také nižším tepelným namáháním méně opotřebovávají, což vede k minimalizaci prostojů stroje z důvodu úpravy či úplné výměny elektrod.

Středofrekvenční zařízení mají i zpětnou vazbu a jsou schopny si upravit výstup proudu v závislosti na výkyvech v síti, znečištění elektrod čí nepřesnostech dílců. V případě, že se proud nepohybuje v nastavených mezích, tak se stroj sám automaticky vypne a upozorní na problémy na displeji řídicí jednotky. Zpětná vazba tedy jednoznačně přispívá ke zlepšení opakovatelnosti spoje.

Řízení samotného pájecího procesu díky řídící jednotce E 600, kterou je středofrekvenční odporová svářečka vybavena je velmi efektivní. Oproti původní metodě s frekvencí 50Hz, kde se parametry nastavují počtem period lze u středofrekvenčního zařízení pracovat v řádech milisekund a u proudu v řádu desítek kA. Opakovatelnost samotného pájecího procesu vzhledem k tomu, že invertorové zdroje nejsou tolik náchylné na výkyvy v síti, je velmi vysoká.

I přes vyšší vstupní náklady na pořízení nového stroje s invertorovým zdrojem je návratnost investice velice rychlá. Důvodem rychlé návratnosti jsou především kratší výrobní časy a menší energetická náročnost zdroje.

Výsledky diplomové práce jsou již dnes využívány v praxi. Použitím středofrekvenčního zařízení a optimalizací parametrů uvedených v této práci došlo ke zkrácení času pájení dílců.

Seznam použitých zdrojů

[1] HLAVATÝ, Ivo. *Teorie a technologie svařování*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2414-7. Dostupné z: http://fs1.vsb.cz/~hla80

[2] SVARINFO: Bodovky a bodování. [online]. 21.6.2008 [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: <http://svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008033102>

[3] KOLAŘÍK, Ladislav. Odporové svařování. *ČVUT - Praha*: *fakulta strojní* [online]. Praha, 11.5.2010 [cit. 2014-01-03]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/odporove_svarovani.pdf>

[4] KANDUS, Bohumil a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. ISBN 80-857-7181-0.

[5] JESVA S.R.O. *Středofrekvenční svařovací stroje* [online]. Hořice v Podkrkonoší, 2009 [cit. 2014-01-21]. Dostupné z: <http://www.jesva.cz/?lang=1>

[6] ŠILAR, Jan. WELDING PROGRESS. *Středofrekvenční bodové a stolní svářecí stroje* [online]. Ústí nad Orlicí,2006 [cit. 2014-01-21]. Dostupné z: <http://www.svarovani.cz/userfiles/files/stolni-bodovky.pdf>

[7] RŮŽA, Viliam. *Pájení.* [překl.] Jindřich Klůma. Praha : SNTL, 1988. str. 452. Sv. I.

[8] SEDLÁČEK, V. a kol. *Difúzní a precipitační procedy.* Praha : SNTL, 1968. str. 229. Sv. I.

[9] KOUKAL, Jaroslav a Tomáš ZMYDLENÝ. *Svařování I.* 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005, 133 s. ISBN 978-80-248-0870-3.

[10]TURŇA, Milan a kol. METAL 2013, Slovak University of Technology, Faculty of Materials and Technology,. *DEVELOPMENT OF TECHN OLOGY FOR BRAZING PA RTS OF SOLAR COLLECT ORS* [online]. Brno, 2011, 18.5.2011 [cit. 2014-01-27]. Dostupné z: <http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_11/lists/papers/1005.pdf>

[11] EXCELFOTO. *Endoskop s PC připojením Reflecta DigiEndoscope USB* [online]. 2013 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: <http://www.excelfoto.cz/reflecta-endoskop-s-pc-pripojenim-reflecta-digiendoscope-usb-13134.html>

[12] NDT SERVIS. *Nedestruktivní zkoušení: Ultrazvukové metody (UT, Phased Array, TOFD a EMAT) Vytisknout* [online]. Chomutov, 2013 [cit. 2014-01-30]. Dostupné z: <http://www.ndtservis.cz/web/index.php/cz/nedestruktivni-zkouseni>

[13] OEZ s.r.o.: *Kompaktní jističe Modeion* [online]. Letohrad, 2011 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.oez.cz/produkty/kompaktni-jistice-modeion-1>

[14] STELLA - WELDING ALLOYS. *Brazing: Copper Phosphorous alloys* [online]. ALBIZZATE, 2009 [cit. 2014-03-17]. Dostupné z: <http://www.stella-welding.com/en/2012/05/copper-phosphorous-alloys/>

[15] STELLA - WELDING ALLOYS. *Fluxes* [online]. ALBIZZATE, 2009 [cit. 2014-03-17]. Dostupné z: <http://www.stella-welding.com/en/2012/05/fluxes/>

[16] Interní materiály firmy OEZ s.r.o.

[17] Schinkmann: *Specialista na odporové svařování* [online]. Mladá Boleslav, 2008 [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/stolni-odporove-lisy-a-bodovky>

Seznam tabulek a grafů

Seznam obrázků